

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

NKONTK14

2017

Juha Rytönen

NAANTALIN JALOSTAMON KRIITTISTEN LAITTEIDEN RISKIPERUSTEINEN TARKASTUS

Juha Rytönen

NAANTALIN JALOSTAMON KRIITTISTEN LAITTEIDEN RISKIPERUSTEINEN TARKASTUS

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia standardin API 580 mukaisen riskiperusteisen tarkastuksen (RBI) eri menetelmien soveltuvuutta ohjaamaan Naantalin jalostamon tarkastustoimintaa. Soveltavassa osassa selvitetään materiaalivalintakaavioiden määrittämien kriittisten laitteiden tarkastuslaajuutta, -ajankäyttöä ja luoksepäästävyyttä yhdentoista (11) prosessiyksikön laitteiden osalta.

Teoriaosa koostuu kirjallisuusselvityksistä, joissa riskiperusteiseen tarkastukseen suosituksia antavat standardit API 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry (2011), API 580 Risk-based Inspection (2016) ja asiantuntijayhteisön koulutusmateriaali NACE: Corrosion Control in the Refining Industry (2013). Soveltava osa sisältää laitteille tehtyjä kenttäkartoituksia, joissa on selvitetty kriittisten laitteiden tarkastusten toteutettavuutta ja laajuutta seisokkeja varten. Lisäksi opinnäytetyön aikana suoritettavat koulutukset ovat olleet hyvänä tukena työn aikana.

Työssä aikaansaatiin riskiperusteisen tarkastuksen tyypin pohdinta tukemaan tarkastusohjelman hankintaa, sitä voidaan hyödyntää myös kehitysprojektissa, jossa laitteille tehdään riskiluokittelut. Työn pohjalta esitettiin suositus soveltuvasta riskiperusteisen tarkastuksen menetelmätyypistä osana Naantalin jalostamon tarkastustoimintaa, johon myös opinnäytetyössä päädyttiin. Semi-kvantitatiivisen RBI:n valintaan vaikuttivat eniten sen käytön kautta paraneva prosessiturvallisuus, riskienhallinta, ennakoitavuus ja tehokkaampi tarkastustoiminta. Riskiperusteisen tarkastuksen käytön laajuutta rajoittaa laitteista käytössä olevan datan määrä, resurssit ja painelaitelain säädökset pakollisille tarkastuksille. Soveltava osa on hyödyksi 2017 seisokin ennakkosuunnittelussa ja sitä ennen tehtävissä yksikköseisokeissa.

ASIASANAT:

Jalostamo, Tarkastus, Vauriomekanismi

Juha Rytönen

RISK-BASED INSPECTION OF THE CRITICAL EQUIPMENT IN NAANTALI'S REFINERY

The goal of this thesis was to study the suitability of the standard API 580 risk-based inspection (RBI) and the different methods used in it to control the Naantali refinery's inspection activities. The applied section of the thesis examines the scope of the inspections, time consumption and accessibility of the critical equipment defined in the material diagram for eleven (11) process units.

The theoretical part consists of literature studies of the risk-based inspection, for which the recommendations come from the standards API 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry (2011), API 580 Risk-Based Inspection (2016) and the expert community training material NACE Corrosion Control in the Refining Industry (2013). The applied part contains field observations for devices, in which the viability and scope of inspections of critical equipment for the unit-shutdowns is examined. In addition, the training carried out during the thesis have been a good support for the thesis.

As a result, considerations for the choosing of a risk-based inspection type that supports the acquisition of the inspection program were achieved and it can also be utilized in the development project of the devices' risk classification. Based on this study, a recommendation was made for a suitable risk-based inspection type as part of the Naantali refinery inspection activities, which the thesis also settles on. The biggest contributors to the choosing of Semi-quantitative RBI were its improvement of process safety, risk management, predictability and efficient inspection operations. The extent of the use of risk-based inspection for the devices is limited by the amount of the usable data, resources, and the pressure equipment act regulations for mandatory inspections. The applied part benefits the pre-planning of the turnaround in 2017 and the unit-shutdowns before that.

KEYWORDS:

Refinery, Inspection, Damage mechanism

SISÄLTÖ

| | |
|--|-----------|
| KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO | 7 |
| 1 JOHDANTO | 9 |
| 2 NESTE OYJ | 10 |
| 2.1 Strategia | 11 |
| 2.2 Turn Around 2017 | 12 |
| 2.3 Tarkastusosasto | 12 |
| 3 TARKASTUSSUUNNITELMAT | 14 |
| 3.1 Suunnitelman tekeminen | 14 |
| 3.2 Tarkastusmenetelmät | 15 |
| 3.3 Materiaalivalintakaaviot | 16 |
| 4 VAURIOMEKANISMIT | 18 |
| 4.1 Yleinen ja paikallinen korroosio (Uniform or Localized Loss of Thickness) | 19 |
| 4.1.1 Piste- ja rakokorroosio (Pitting & Crevice Corrosion) | 20 |
| 4.1.2 Eroosikorroosio (Erosion-Corrosion) | 21 |
| 4.1.3 Eristeiden alapuolinen korroosio (Corrosion under insulation, CUI) | 22 |
| 4.1.4 Suolaveden aiheuttama korroosio (Hydrogen Chloride & Hydrochloric Acid HCl Corrosion) | 24 |
| 4.1.5 Ammonium bisulfidi (NH ₄ HS) | 25 |
| 4.1.6 Korkean lämpötilan rikkikorroosio (HTSC) | 26 |
| 4.2 Jännityskorroosio (SCC) | 28 |
| 4.2.1 Kloridien aiheuttama jännityskorroosio (CISCC) | 30 |
| 4.2.2 Alkaalien aiheuttama jännityskorroosio (ASCC) | 32 |
| 4.2.3 Polytionihappojännityskorroosio (PASCC) | 33 |
| 4.3 Vetyvauriot | 34 |
| 4.3.1 Vedyn aiheuttamat säröytymismekanismit (HIC & SOHIC) | 36 |
| 4.3.2 Vetyrakkulointi (Hydrogen Blistering) | 38 |
| 4.3.3 Korkealämpötila vetyhyökkäys (HTHA) | 39 |
| 4.4 Haurasmurtuma (Brittle Fracture) | 43 |
| 5 RISKIPERUSTEINEN TARKASTUS (RBI) | 46 |
| 5.1 Riskiperusteisen tarkastusohjelman vaatimukset | 47 |

| | | |
|-----|--|-----------|
| 5.2 | Seuraukset ja todennäköisyys | 47 |
| 5.3 | Riski | 48 |
| 5.4 | RBI-tyypit | 49 |
| 5.5 | Riskimatriisi | 51 |
| 5.6 | Kriittisten laitteiden luoksepäästävyyden ja tarkastusajankäytön suunnittelu | 52 |
| 5.7 | Riskiperusteisen tarkastusohjelman hyödyt ja rajoitteet | 54 |
| | LÄHTEET | 56 |

KAAVAT

| | | |
|---------|------------------------------|----|
| Kaava 1 | Riski (API RP 580 2016, 11.) | 48 |
|---------|------------------------------|----|

KUVAT

| | | |
|---------|--|----|
| Kuva 1 | Naantalin jalostamo (Neste Oyj 2015.) | 10 |
| Kuva 2 | Organisaatiokaavio (Neste Oyj 2017.) | 13 |
| Kuva 3 | Pistekorrosiota kolonnin vaipassa (API RP 572 2009, 123.) | 20 |
| Kuva 4 | Epätasaisia virtauspintoja (Kunnossapitoyhdistys 2004, 13.) | 22 |
| Kuva 5 | Lähikuva T-haarasta eristeet poistettuna (API RP 571 2011, 4-112.) | 23 |
| Kuva 6 | Vaurioituneen 2” mutkan poikkileikkaus hapanvesilinjasta (API RP 571 2011, 5-12.) | 25 |
| Kuva 7 | Sulfidin tunkeutuminen metallin sisään (Kunnossapitoyhdistys 2004, 151.) | 27 |
| Kuva 8 | Alkuperäinen ja kulunut 9Cr-1Mo putki (API RP 571 2011, 4-164.) | 28 |
| Kuva 10 | Ainevahvuuden menetyksen vakavuuden vertaaminen (Jari Aromaa 2005, 77.) | 29 |
| Kuva 11 | Lämpökäsittelyn vaikutus mikrorakenteeseen (Witting, Pettinen 2014, 85.) | 30 |
| Kuva 12 | Ulkopuolista säröilyä ja halkeilua eristeidenalaisessa 304SS-typin teräsputkessa (API RP 571 2011, 4-187.) | 31 |
| Kuva 13 | Mikroskooppikuva hitsin poikkileikkauksesta (API RP 571 2011, 5-59.) | 33 |
| Kuva 14 | Rakkuloiden ja vetyhaurastumisen muodostuminen (Kunnossapitoyhdistys 2004, 190.) | 37 |
| Kuva 15 | Mikroskooppikuva HIC-vaurion luonteesta porrasmaiseen, vaiheittaiseen halkeiluun (API RP 571 2011, 5-67.) | 38 |
| Kuva 16 | Laajamittaista vetyrakkulointia painelaitteen pinnalla (API RP 571 2011, 5-65.) | 39 |
| Kuva 17 | Mikrorakenne kuva HTHA:lle altistuneesta teräksestä (API RP 941 2016, 9.) | 40 |
| Kuva 18 | Murtumismekanismit (Callister & Rethwisch 2015, 288.) | 43 |
| Kuva 19 | Murtopinnat (Callister & Rethwisch 2015, 288.) | 44 |
| Kuva 20 | Haurasmurtuma lämmönvaihtimessa (API RP 571 2011, 4-30.) | 45 |

KUVIOT

| | |
|---|----|
| Kuvio 1 Riskiperusteisen tarkastusohjelman käytön vaikutus (API RP 580 2016, 13.) | 46 |
| Kuvio 2 RBI tyypit (API RP 580 2016, 16.) | 50 |
| Kuvio 3 RBI-prosessikaavio (API RP 580 2016, 19.) | 50 |
| Kuvio 4 Riskimatriisi (API RP 580 2016, 59.) | 51 |

TAULUKOT

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Suositellut tarkastustekniikat vetyvaurioille (API 571, 5-63.) | 36 |
|--|----|

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

| | |
|--------|---|
| CUI | Corrosion Under Insulation, Eristeiden alapuolinen korroosio |
| VT | Visual testing, Silmämääräinen tarkastus |
| UT | Ultrasonic testing, Ultraäänitarkastus |
| RT | Radiographic testing, Radiografinen tarkastus |
| MT | Magnetic particle testing, Magneettijauhetarkastus |
| EC | Eddy Current, Pyörrevirtatarkastus |
| PT | Liquid penetrant testing, Tunkeumanestetarkastus |
| AET | Acoustic emission, Akustinen emissiotarkastus |
| WFMT | Wet fluorescent magnetic particle testing, Fluoresoiva magneettijauhetarkastus |
| FMR | Field metallographic replication, Jäljennetarkastus |
| IRIS | Internal rotating inspection system, Edistynyt ultraäänitarkastustekniikka |
| ACFM | Alternating current field measurement, Vaihtovirta mitausmenetelmä |
| AUBT | Automated ultrasonic backscatter testing, Edistynyt ultraäänitarkastustekniikka |
| SWUT | Shear wave ultrasonic testing, Edistynyt ultraäänitarkastustekniikka |
| TOFD | Time of flight diffraction, Ultraääni kulkuakateknikka |
| RFEC | Remote field eddy current testing, Etäkäyttöinen pyörrevirtatarkastus |
| IR | Infrared thermographic testing, Infrapunalämpökameratarkastus |
| HAZ | Heat affected zone, Lämpömuutosvyöhyke hitsissä |
| PWHT | Post weld heat treatment, Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely |
| StabHT | Stabilization heat treatment, Stabilisointihevutus |
| RBI | Risk based inspection, Riskiperusteinen tarkastus |
| HB | Brinell kovuusarvo |
| POF | Probability of failure, Vaurioitumisen todennäköisyys |

| | |
|-------|--|
| COF | Consequence of failure, vaurioitumisen seuraus |
| PASCC | Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking, Polytionihappojännityskorroosio |
| ASCC | Alkaline Stress Corrosion Cracking, Alkaalien aiheuttama jännityskorroosio |
| CISCC | Chloride Stress Corrosion Cracking, Kloridien aiheuttama jännityskorroosio |
| HTSC | High Temperature Sulfide Corrosion, Korkealämpötila rikki-korroosio |
| SSC | Sulfide Stress Corrosion, Sulfidijännityskorroosio |
| SCC | Stress Corrosion Cracking, Jännityskorroosio |
| HIC | Hydrogen Induced Cracking, Vedyn aiheuttama säröily |
| SOHIC | Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking, Jännitysten ja vedyn aiheuttama säröily |
| HTHA | High Temperature Hydrogen Attack, Korkealämpötila-vetyhyökkäys |

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoitus on tuottaa materiaalia riskiperusteisen tarkastustoiminnan mahdollistavan ohjelmiston hankinnan tueksi ja olla soveltavan osan kautta apuna tarkastussuunnitelmien teossa luoksepäästävyys- ja resurssisuunnittelun osalta. Keskeisen teoriaosuuden ja soveltavan osan jälkeen pohditaan riskiperusteiseen tarkastukseen tarkoitettun ohjelmiston tarvetta tarkastusosaston työkaluksi. Myös toimintatapojen ja käytäntöjen dokumentointi pidettiin opinnäytetyön aikana hyödylliseksi.

Keskeisimpinä lähdemateriaaleina työssä on käytetty alan huippuasiantuntijoiden (NACE) Korroosiokoulutusmateriaalia Corrosion Control In The Refining Industry ja API:n (American Petroleum Institute) Standardeja API 571 (Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry) ja API 580 (Risk-based Inspection). Kyseiset lähteet ovat viimeisimpää ja laadukkaimpaa saatavilla olevaa tietoa aiheesta.

Opinnäytetyössä tarkastellaan riskiperusteisen tarkastuksen eri tyyppejä ja keskitytään semi-kvantitatiiviseen lähestymistapaan, jota pidettiin Nesteen tarpeisiin parhaiten soveltuvana vaihtoehtona.

Alussa esitellään Neste Oyj:stä yrityksenä, jonka jälkeen kerrotaan tarkastustoiminnasta. Teoriaosassa käsitellään olennaisimpia vauriomekanismeja, joiden omaksuminen on edellytys luvussa 5 käsiteltävään riskiperusteiseen tarkastustoimintaan (RBI). Työn viimeisessä luvussa pohdintaan RBI-ohjelmiston hyötyjä Nesteen tarpeisiin nähden.

2 NESTE OYJ

Neste on pörssiyritys, jolla on takanaan jo pitkä historia. Neste perustettiin 1948 Suomen öljyhuollon turvaamiseksi. Naantalin jalostamon rakentamispäätös syntyi joulukuussa 1954, jalostamo käynnistettiin heinäkuussa 1957. Kapasiteettia nostettiin 1962 alun 800 000 tonnista 2,5 miljoonaan tonniin. Öljytuotteiden kulutuksen kasvettua Suomi tarvitsi toisen jalostamon, joka käynnistettiin jo 1965 Kilpilahdessa, Porvoon lähellä. Seuraavien vuosikymmenien aikana öljynjalostuskapasiteetti kasvoi ja yhtiö laajensi liiketoiminta-alueitaan. Osasta liiketoiminnoista kuitenkin myöhemmin luovuttiin, kuten muun muassa maakaasun, öljyn ja kaasunetsintä ja tuotanto. Helsingin pörssiin Neste Oyj listautui vuonna 1995 valtion säilyessä pääomistajana. (Neste Oyj 2016e.)

Neste on nykyään edelläkävijä öljynjalostuksessa ja uusiutuvien ratkaisujen käytössä. Neste tarjoaa asiakkailleen puhtaamman liikenteen ja teollisuuden tuotteita, jotka perustuvat huippututkimukseen. Dow Jonesin kestävä kehityksen indeksissä Neste on saanut vastuullisesta toiminnastaan tunnustusta ja kuuluu maailman vastuullisimpien yhtiöiden Global 100 -listalle. Yhtiön liikevaihto oli vuonna 2014 noin 15 miljardia euroa. Tänä päivänä Nesteellä työskentelee jo noin 5000 henkilöä. (Neste Oyj 2016d.)

Neste pyrkii olemaan öljynjalostusalan edelläkävijä ja uudistaja, joka haluaa haastaa perinteisiä toimintamalleja. Vähähiilisten ja uusiutuvien raaka-aineiden käyttöön panostetaan tehokkaasti. Neste onkin saavuttanut maailman suurimman uusiutuvan dieselin tuottajan tittelin ja pyrkii kasvuun myös polttoainemarkkinoiden ulkopuolella. (Neste Oyj 2016e.) Alla ilmakuva Naantalin jalostamosta.



Kuva 1 Naantalin jalostamo (Neste Oyj 2015.)

Naantalin jalostamolla on 30 prosessiyksikköä, laaja säiliöalue, sekä myös oma satama, laboratorio, jakeluterminaali ja palokunta. Myös insinööritoimisto Neste Jacobs Oy toimii alueella. Jalostamo on kokonaispinta-alaltaan noin 300 hehtaaria. Naantalin jalostamolla tuotetaan kaikkia tärkeimpiä öljytuotteita teollisuuteen, liikenteeseen, maatalouteen ja energiantuotantoon. Tuotteita ovat muun muassa bensiini, diesel, kevyt ja raskas polttoöljy, sekä nestekaasut. Jalostamolla tuotetaan myös erikoistuotteita, kuten bitumeja, liuottimia ja pienmoottoribensiiniä, joilla saadaan korkeampi jalostusmarginaali saman kokuokan jalostamoihin verrattuna. Kaikki jalostetut liikennepolttoaineet ovat rikittömiä. Tuotannon määrä on noin 3 miljoonaa tonnia vuodessa ja jalostuskapasiteetti on noin 50 000 tynnyriä päivässä. Varastotilaa raakaöljylle ja öljytuotteille on yli miljoona kuutiometriä. Jakeluterminaalissa lastataan noin 120 säiliöautoa päivittäin ja satamassa käy vuosittain 350 laivaa, jotka kuljettavat lastia 4,5 miljoonaa tonnia. Satama on Suomen viidenneksi suurin liikennemäärällä mitattuna. Henkilöstöä jalostamolla on noin 350. (Neste Oyj 2016a.)

2.1 Strategia

Nesteellä on kaksi selvää strategista tavoitetta: halu olla Itämeren alueen johtava vähähiilisten ratkaisujen tarjoaja ja toimija, sekä kasvaa globaalisti uusiutuvista raaka-aineista tehtävissä tuotteissa. Nesteen on pyrittävä tarjoamaan asiakkaalleen myös fossiilisia, kuin uusiutuviakin tuotteita asiakkaiden tarpeiden mukaisesti. Keskeistä on asiakastytyväisyys, jota kautta kasvu on saatavissa. Neste pyrkii parantamaan lisäjalostusmarginaalia, joka vähentää yhtiön herkkyyttä markkinoiden muutoksille. Lisäjalostusmarginaalia pyritään saavuttamaan käytettävyyden ja kustannusten hallinnalla, tuotantolaitosten kehittämisellä ja markkina-aseman vahvistamisella. (Neste Oyj 2015.)

Neste haluaa laajentaa liiketoimintaansa merkittävästi liikennekäytön ulkopuolisiin uusiutuviin tuotteisiin vuoteen 2020 mennessä. Nesteen kilpailuetuina ovat muun muassa joustava raaka-ainevalikoima ja globaali toimitusketju. Neste on jo saavuttanut kyvyn käyttää jäte- ja tähderaaka-aineita 100-prosenttisesti. Kasvualueiksi on tunnustettu uusia sovellusaloja, kuten biopohjaiset tisleet, kemikaalit ja muovit. Nesteellä on jo ensimmäiset kumppanuudet biopohjaisissa tuotteissa. Yhteistyötä aiotaan jatkaa johtavien globaalien tuotemerkkien omistajien kanssa ainutlaatuisen biomuovien ja ekosysteemin ympärillä. Nesteen tavoite on saada uusiutuvien liiketoiminnan myynnistä 20 % liikennepolttoaineiden ulkopuolelta vuoteen 2020 mennessä. (Neste Oyj 2015.)

2.2 Turn Around 2017

Seisokin tarkoituksena on varmistaa Naantalin jalostamolle turvallinen ja korkean käyttöasteen käyntijakso seuraavaksi seisokkiväliksi. Tavoitteena on varmistaa laitoksen luotettavuus ja vähintään 290 t/h raakaöljysyöttö turvallisen operointi-ikkunan sisällä. (Neste Oyj 2016b.)

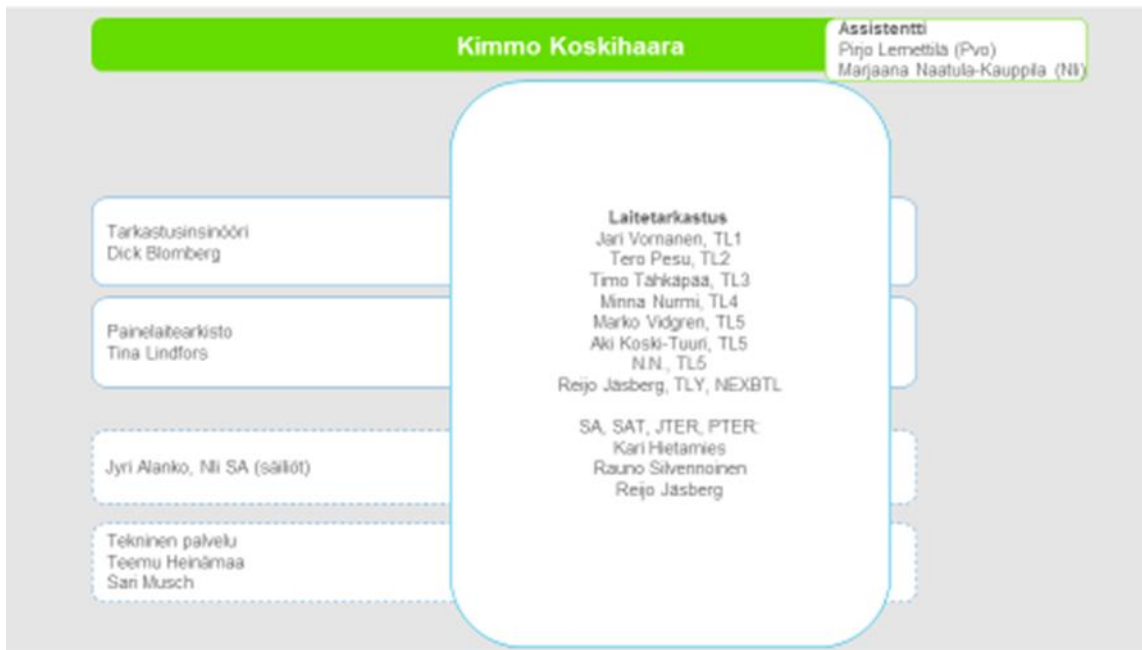
Turn Around 2017 tulee olemaan Naantalin jalostamon historian suurin ja kompleksisin seisokki johtuen runsaista investoinneista. Seisokin tavoitemittarit tulevat keskittymään turvallisuuteen, laatuun, kustannuksiin ja aikatauluun. Työmaavahvuus tulee olemaan yli 1000 henkilöä ja työtunteja kertyy yhteensä yli 500 000. Huoltotöitä tehdään yli 2400 kpl muun muassa painelaitteille, putkistolle ja instrumenteille. (Neste Oyj 2016c.)

Seisokin jälkeen käyttöaste nousee, sekä Naantalin ja Porvoon välinen laivaliikenne kasvaa noin 20–25 %. Naantalissa tullaan tuottamaan enemmän syöttöaineita Porvoon jalostamolle ja vähemmän muun muassa raskasta polttoöljyä. (Turun Sanomat 2016.)

2.3 Tarkastusosasto

Tarkastusosastoa johtaa mekaanisen eheyden ja tarkastuksen päällikkö. Osasto koostuu kymmenestä (10) tarkastajasta, yhdestä (1) tarkastusinsinööristä ja yhdestä (1) painelaittearkiston hoitajasta.

Mekaaninen eheys ja tarkastus



NESTE

9.1.2017

Kuva 2 Organisaatiokaavio (Neste Oyj 2017.)

Naantalissa tästä ryhmästä yleensä työskentelee kolme (3) tarkastajaa. Tarkastusosaston kanssa yhteistyötä tekee tekninen palvelu, josta pääsääntöisesti Naantalissa työskentelee yksi materiaali- ja tarkastusasiantuntija.

3 TARKASTUSSUUNNITELMAT

Laitetarkastuksen keskeisin tarkoitus on määrittää laitteiden mekaaninen kunto ja havaita mahdollisten vaurioiden tyyppi, vaurioitumisnopeus ja syy. Informaatio on huolellisesti dokumentoitava jokaisen tarkastuksen yhteydessä, jotta sitä voidaan hyödyntää suunnitellessa seuraavia tarkastuksia, korjauksia ja laitteiden uusimisia. Riskiperusteista tarkastusta (RBI) käytettäessä tarkastushistorian analysointi on hyvin keskeisessä osassa ja luo perustan sen tekemiselle. (API RP 572 2009, 12.)

Yksi jaksottaisesti aikataulutettujen tarkastusten päätarkoituksista on havaita vauriomekanismien painelaitteille aiheuttamat vauriot, jotka voivat johtaa prosessiturvallisuuspoikkeamiin, kuten painelaitteiden hajoamisiin johtaen esimerkiksi onnettomuuteen tulipalon, myrkyllisten aineiden päästöjen tai muun ympäristövaaran muodossa. Tarkastussuunnitelma organisoii tarkastukset ja ohella tapahtuvat toimenpiteet niin, että voidaan määrittää kohteen kunto painelaitteen omistajalle. On huolehdittava, että tarkastukset tarjoavat tarvittavat tiedot tarpeeksi ajoissa, ennen kuin kohteelle on tullut kriittisesti haitallisia vaikutuksia. (API RP 572 2009, 15.)

3.1 Suunnitelman tekeminen

Tarkastussuunnitelman pääasiallinen tekovastuu on laitetarkastajalla ja/tai tarkastussinöörillä. Korroosioasiantuntijaa on suositeltavaa konsultoida potentiaalisista vauriomekanismeista ja niille todennäköisimmin alttiista kohteista. Tarkastussuunnitelmien tekemisessä on käytettävä useita eri tietolähteitä. Tarkastukseen käytettävät laitteet ja menetelmät on valittava perustuen arvioituihin vauriomekanismityyppeihin. Tarkastusmenetelmät ja -laajuudet on arvioitava niin, että määritellyt tekniikat voivat asianmukaisesti tunnistaa vauriomekanismit, vaurioiden laajuudet ja niiden aiheuttaman vahingon vakaavuuden. (API 510 2014, 17.)

Tarkastussuunnitelmia laatiessa on otettava huomioon seuraavia asioita (API RP 572 2009, 15-16.):

1. Tunnetut tai odotetut vauriomekanismit
2. Ensisijaiset alueet joihin vaurioita odotetaan tulevan
3. Odotettu vaurio ja herkkyys vaurioitumiseen

4. Tarkastustekniikat, jotka voidaan tehokkaasti kohdistaa epäilyille alueille
5. Turvallinen luoksepääsy kohteeseen
6. Mahdolliset kielteiset vaikutukset joita esimerkiksi suojakalvojen ja pinnoitteiden poistaminen tarkastusten mahdollistamiseksi voivat tuottaa. Käynnistyksen ja sammutuksen aiheuttama räsitus on myös otettava huomioon.
7. Tarkastustoimintaan osallistuviin henkilöihin mahdollisesti kohdistuvat riskit.
8. Voiko laitteen tarkastaa ulkopuolisesti sisäpuolisen tarkastuksen sijaan?
9. Käynnin aikaisten seurantatoimien kautta tiedetyt viat, jotka on arvioitu hyväksyttäviksi.

Tarkastukset on aikataulutettava harkittuihin intervaleihin ottaen huomioon seuraavat asiat (API 510 2014, 17-18):

1. Vaurion tyyppi
2. Vaurion etenemisnopeus
3. Kohteen kyky kestää vauriota
4. Tarkastusmenetelmien vaurion todentamiskyky
5. Maksimi aikaväli tarkastukselle, joka on määrätty laissa ja standardeissa
6. Edellisen tarkastuksen laajuus
7. Operointi historia
8. Fyysiset tai operoinin muutokset, jotka voivat vaikuttaa tarkastussuunnitelmaan

Paineenalaiset laitteet voivat olla alttiita monenlaisille vaurioille eri vauriomekanismien johdosta. Jokaiselle vauriomekanismille on suositeltu erilaiset tarkastusmenetelmät, joita voi käyttää apuna tarkastussuunnitelmien tekemisessä. (API 510 2014, 21.)

Laitteen vaurio on riippuvainen sen materiaalista, valmistusmenetelmästä, mitoituksesta, rakenteesta, sekä käyttö- ja toimintaolosuhteista. Tarkastajan on oltava tietoinen näistä lähtötiedoista tarkastussuunnitelmaa tehtäessä. (API 510 2014, 22.)

3.2 Tarkastusmenetelmät

Tarkastusmenetelmistä on saatavilla runsaasti todella yksityiskohtaista tietoa. Tarkastusmenetelmiä ei käydä tässä opinnäytetyössä erikseen läpi. Opinnäytetyöhön liittyvät keskeiset standardit tarkastusmenetelmistä ovat:

- AE, acoustic emission, examination of metallic pressure equipment during proof testing, planar location of AE sources SFS-EN 14584
- AE, acoustic emission, examination of metallic pressure equipment during proof testing, zone location of AE sources SFS-EN 15495
- MT, magneettijauh tarkastus SFS-EN ISO 17638
- PT, tunkeumanestetarkastus SFS-EN ISO 3452-1
- RT, radiograafinen kuvaus röntgen ja gammakuvaus filmitekniikalla SFS-EN ISO 17636-1
- RT, radiograafinen kuvaus röntgen ja gammakuvaus digitaalitekniikalla SFS-EN ISO 17636-2
- RT, metallisten materiaalien radiograafinen kuvaus käyttäen filmitekniikkaa ja röntgen- tai gammasäteilyä, perusohjeet SFS-EN ISO 5579
- UT, paksuusmittaus ultraäänellä SFS-EN 14127
- UT, ultraäänitarkastus, yleisperiaatteet SFS-EN ISO 16810
- UT, vähintään 6mm paksujen teräslevytuotteiden ultraäänitarkastus (heijastusmenetelmät) SFS-EN 10160
- UT-K, ultraäänitarkastus (kerrostumatarkastus) SFS-EN ISO 17640
- UT TOFD, automaattinen vaiheistettu ultraäänitarkastus SFS-EN ISO 13588
- VT, sulahitsausliitosten silmämääräinen tarkastus SFS-EN ISO 17637

3.3 Materiaalivalintakaaviot

Materiaaliasiantuntijoiden laatimat materiaalivalintakaaviot esittävät pääkohdittain prosessilaitteiden ja putkiston materiaalivaatimukset. Materiaalivalintakaaviot antavat tarvittavaa tietoa sekä putkisto- ja instrumentaatiodiagrammin (P&ID) että laitteiden mekaanisten tieto-lomakkeiden tekoa varten. Materiaalivalintoihin vaikuttaneet prosessi- ja suunnittelutiedot näkyvät materiaalivalintakaavioissa. (OQD-16133 2013, 3.)

Tarkastussuunnitelmien tekeminen perustuu materiaaliasiantuntijoiden tekemien materiaalivalintakaavioiden apuna käyttöön.

Materiaalivalintakaavioista selviää eri prosessiyksiköiden laitteiden ja putkistojen tiedot seuraavilta osin (OQD-16133 2013, 5-11):

- laitteiden ja putkistojen käytössä olevat materiaalit materiaaluokkien ja materiaalistandardien mukaisesti

- maalaukset ja pinnoitteet
- Valmistukseen liittyvät lisätiedot kuten PWHT, StabHT, 100 % RT, Kovuus- ja puhtausvaatimukset
- lisä- ja erikoisvaatimukset, sekä huomautukset kuten esimerkiksi matalat lämpötilat
- materiaalisuositukset
- prosessitiedot
- poikkeukset esimerkiksi prosessiolosuhteissa suunniteltuihin prosessin operointiolosuhteisiin nähden
- erilaiset lisätiedot jotka liittyvät esimerkiksi materiaaleihin, operointiin tai korroosion hallintaan

4 VAURIOMEKANISMIT

Korroosio, metallurgiset ja mekaaniset vauriomekanismit johtavat jalostamoilla usein laitteiden pysäytyksiin ja keskeyttävät jalostusprosessin aiheuttaen samalla turvallisuusriskejä. Vauriomekanismien kartoittaminen on ensiarvoisen tärkeää turvallisuuden ja tuotavuuden näkökulmasta. Oikea-aikainen tarkastus ja huolto tarvitaan vähentämään yllättäviä pysäytyksiä sekä niistä aiheutuvia kuluja. (NACE International 2013, 1-2.)

Korroosio johtaa materiaalin, kuten esimerkiksi metallin heikkenemiseen reagoiessaan ympäristön kanssa. Materiaalissa ei välttämättä tapahdu muutosta painossa tai silminnähtävää heikkenemistä, mutta silti materiaali voi vaurioitua yllättäen. (NACE International 2013, 1-3.)

Korroosioympäristön muodostavat ilmakehä, vesiliuokset, maaperä, hapot, emäkset, epäorgaaniset liuottimet, sulat suolat ja nestemäiset metallit. Ympäristö sisältää laajan joukon erilaisia kemiallisia koostumuksia, jotka tuovat mukanaan alttiuden korroosiolle. Tällaisia ovat muun muassa kosteus, happi, suolapitoisuus, emäksisyys ja happamuus, sekä monet eri bakteerimuodot. (Callister, Rethwisch 2015, 664.)

Korroosiovaurion aiheutuminen voi olla yleistä tai paikallista. Paikallinen korroosio aiheuttaa vakavampia seuraamuksia kuin yleinen korroosio. Yleisessä korroosiossa sähkökemialliset reaktiot tapahtuvat tasaisesti koko metallin pinnalla, kun taas paikallisessa korroosiossa vaurio on keskittynyt vain pienelle alueelle, jolloin se aiheuttaa usein vaarallisia ja odottamattomia vaurioita. Paikallisiin korroosiotyyppeihin luetaan esimerkiksi galvaaninen-, piste-, rako-, raeraja- ja jännityskorroosio. (Aromaa 2005, 62.)

Jalostamoympäristön korroosiot voidaan jaotella kahteen osaan:

- Matalan lämpötilan korroosioihin, jotka esiintyvät 260 °C alapuolella veden läsnäollessa.
- Korkean lämpötilan korroosioihin, jotka esiintyvät 260 °C yläpuolella ilman veden läsnäoloa

Näiden kahden kategorian alla on monia eri korroosiotyyppejä, jotka esiintyvät hyvin spesifien materiaaliyhdisteiden, ympäristön ja operoinnin vaikutusten alaisina. (NACE International 2013, 1-3.)

Useimmat metallit hapettuvat reagoituaan hapen kanssa ja muodostavat korroosiotuotekerroksen esimerkiksi oksidikerroksen. Muodostunut korroosiotuotekerros hidastaa hapen ja metallin reagoimista keskenään, jolloin korrosio hidastuu. Korroosionopeus on riippuvainen siitä, kuinka nopeasti metalli tai happi pystyvät kulkemaan oksidikerroksen läpi. Lämpötilan noustessa reaktionopeus kiihtyy. Tällöin voi muodostua erityyppisiä oksidiyhdisteitä, mutta perusilmiöt ovat pääpiirteineen samankaltaisia. Seoskomponenttien reagoiminen kyseisen ympäristön yhdisteiden kanssa vaikuttaa metalliseoksen kestävyYTEEN. Korroosion tapahtuminen riippuu myös metallin tai seoskomponenttien kemiallisista ominaisuuksista. (Kauppi 2013, 13.)

Vauriomekanismien tunnistaminen on hyvin tärkeää laadukkaan ja tehokkaan riskianalyyysin aikaansaamiseksi. Laitteiden sisäisen ja ulkoisen toiminnan, sekä vuorovaikutuksen ymmärtäminen mekaanisessa- ja prosessiympäristössä on hyvin keskeinen osa vauriomekanismien tunnistamista. (API RP 580 2016, 36-37.)

Tässä kappaleessa tutustutaan Naantalin jalostamolle tehtyjen materiaalivalintakaavioiden sisältämiin vauriomekanismeihin. Vauriomekanismit ovat jaoteltu neljään osaan.

4.1 Yleinen ja paikallinen korrosio (Uniform or Localized Loss of Thickness)

Yleinen korrosio on tavallisin korroosiotyyppi. Yleistä korroosiota tapahtuu tyypillisesti ilmasto-olosuhteista johtuen useimmilla suojaamattomilla metallipinnoilla ja sitä voi esiintyä myös prosessiliuoksissa. Materiaali syöpyy yleisessä korroosiossa samalla nopeudella koko pinnaltaan anodisten ja katodisten reaktioiden tapahtuessa materiaalin pinnalla. Korrosio ei kuitenkaan ole aivan tasaista, vaan pinta jakautuu anodi- ja katodialueisiin, joista vain anodialueet syöpyvät. Nämä alueet vaihtavat paikkaa jatkuvasti, jolloin pinnan syöpyminen näyttää tasaiselta. Prosessiteollisuudessa havaittavissa korroosionopeuksissa voidaan käyttää seuraavia sääntöjä, kun yleinen korroosionopeus on:

- 0,01 mm / vuodessa: ei tapahdu haitallista korroosiota.
- 0,1 mm / vuodessa: vaatii huoltotoimenpiteitä ja korroosiovaran käyttöä.
- 1 mm / vuodessa: vaatii materiaalin vaihtamista, ellei erityiset taloudelliset syyt, kuten lyhyt huoltoväli puolla materiaalin käyttöä.
- 10 mm / vuodessa: materiaali on täysin sopimaton kohteeseen.

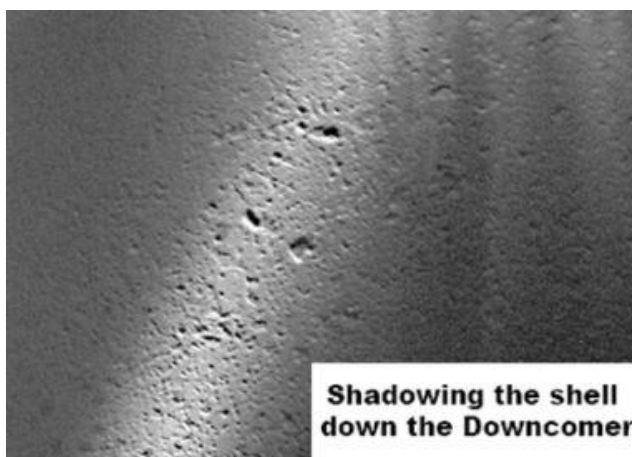
Suunnittelija voi lisätä kuormaa kantavaan ainesvahvuuteen korroosiovaran. Korroosiovara lasketaan käyttövuosien määrällä kerrottuna vuotuisella korroosionopeudella

(mm/vuosi). Yleistä korroosiota estetään materiaalin valinnalla kestävämpään ja pinnoittamalla. Liuosympäristössä säädetään pH-arvoa, poistetaan liuksesta happi tai inhiboidaan. Myös metallin passivointi anodisella virralla tai metallin liukenemisen hidastaminen katodisella virralla ovat joissain tapauksissa hyödyllisiä suojausmenetelmiä. (Aromaa 2005, 64-65.)

4.1.1 Piste- ja rakokorroosio (Pitting & Crevice Corrosion)

Pistekorroosio on hyvin paikallinen korroosimuoto, joka ilmenee pieninä reikinä tai kuoppina. Pistekorroosion havaitseminen on usein vaikeaa, koska sillä on taipumus esiintyä korroosiotuotekerroksen alla. Laitteivat ovat kokonaisuutta ajatellen yleensä suhteellisen pieniä. Pistekorroosiota esiintyy yleensä kohteen sisäpuolella kloridien läsnä ollessa, kun sisällön virtaus on todella hidasta tai seisovaa. Kloridi-ionit ovat tarpeeksi pieniä tunkeutumaan suojakalvoista ja korroosiosuojauksista läpi. Metallin hapettuminen tapahtuu kuopassa sillä aikaa, kun katodinen reaktio vaikuttaa läheisillä pinoilla. Tuloksena kuopassa tuotetut ionit ja kloridi-ionit pyrkivät saavuttamaan sähköisen neutraalisuuden. Myöhemmin hydrolyysi alentaa liuoksen pH-arvoa kuopan sisällä ja nopeuttaa hapettumista. Pistekorroosio on ongelmana martensiittisille, ferriittisille ja austeniittisille ruostumattomille teräksille. Seostaminen molybdeenillä vähentää pistekorroosiota ruostumattomilla teräksillä. (NACE International 2013, 1-24.)

Pistekorroosion voi havaita silmämääräisessä tarkastuksessa käyttäen apuna valoa esimerkiksi taskulampusta suunnattuna pintaa pitkin, jolloin korroosion aiheuttamaan kuoppaan muodostuu varjo. Kuvassa 3 kyseistä tekniikkaa käytetään kolonnin vaipan sisäpuoliseen tarkastukseen, jonka avulla havaitaan pistekorroosiota. (API RP 572 2009, 123.)



Kuva 3 Pistekorroosiota kolonnin vaipassa (API RP 572 2009, 123.)

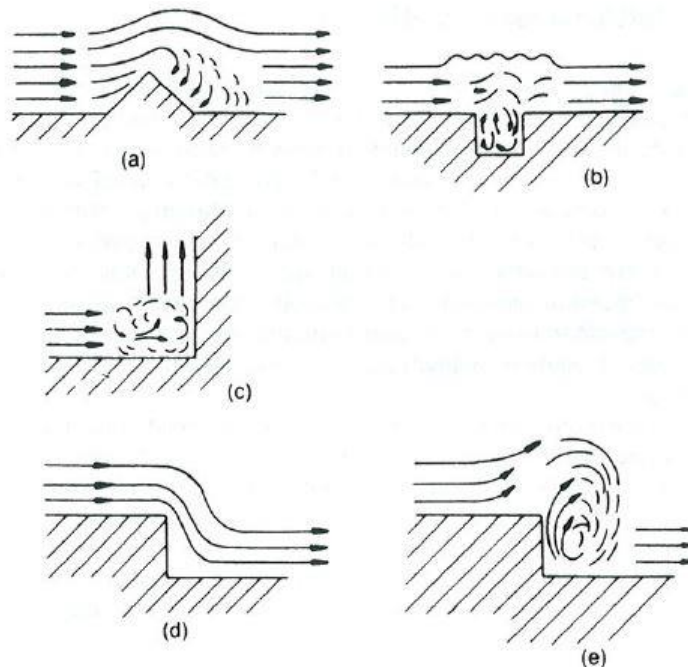
Rakokorroosio on paikallista ja esiintyy kiinteissä osissa kuten pultit, tiivisteet, prikat, kierteet, limittäisliitokset, sekä eristeiden ja korroosiosuojauksien alla märissä olosuhteissa. Ruostumattomat teräkset ovat erityisen alttiita rakokorroosiolle kuumassa merivesiympäristössä. Hiiliteräksillä rakokorroosiota esiintyy usein tiivisteiden ja muiden edellä mainittujen kohteiden luona. Rakokorroosio alkaa kun rako on tarpeeksi suuri nesteen pääsyle, josta se ei pääse kuitenkaan vaihtumaan yhtä nopeasti kuin muilla pinnan alueilla. Rakokorroosion mekanismi on samanlainen kuin pistekorroosiolla, jossa rako toimii pistemäisen kuopan tavoin. Rakokorroosio on vakavinta korkeita kloridipitoisuuksia sisältävissä ympäristöissä. (NACE International 2013, 1-25.)

4.1.2 Eroosiokorroosio (Erosion-Corrosion)

Eroosiokorroosio on virtaavan aineen aiheuttamaa kemiallisen tai sähkökemiallisen korroosion ja mekaanisen kulumisen yhteisvaikutuksesta aiheutuvaa syöpymistä. Liuenneet metalli-ionit kuluvat virtauksen mukana materiaalin pinnalta, eivätkä pääse muodostamaan suojaavaa korroosiotuotekerrosta. Eroosiokorroosioon vaikuttavat olennaisesti liuoksen virtausnopeus ja sen vaihtelut, sekä mahdollisesti esimerkiksi putkiston huono rakenne, joka johtaa virtauksen pyöreilyyn. (Aromaa 2005, 68.)

Käytännössä kaikki metallit ja metalliseokset voivat olla alttiita eroosiokorroosiolle. Yleensä eroosiokorroosiota havaitaan erityisesti putkistojen mutkissa ja risteyksissä, suupistuksissa ja paikoissa, joissa virtaus muuttaa suuntaansa tai siitä tulee äkillisesti turbulenttista. Potkurit, turbiinin siivet, venttiilit ja pumput ovat myöskin tyypillisiä eroosiokorroosio vaurioille alttiita kohteita. (Callister, Rethwisch 2015, 661.)

Kuvassa 4 on muutama esimerkki pyörteitä synnyttävistä virtauspinnoista, joissa on epätasaisuuksia. Pieni virtausnopeus ei tuota pyörteitä tapauksessa (d), kuten suuri virtausnopeus tapauksessa (e). (Kunnossapitoyhdistys 2004, 13.)



Kuva 4 Epätasaisia virtauspintoja (Kunnossapitoyhdistys 2004, 13.)

4.1.3 Eristeiden alapuolinen korroosio (Corrosion under insulation, CUI)

Korroosiota esiintyy eristeiden alapuolella, josta vesi ei pääse haihtumaan liian matalan lämpötilan vuoksi tai muuten poistumaan. Alttiita ovat hiili- ja niukkaseosteiset teräkset, sekä duplex- ja SS300-sarjan teräkset. (API RP 571 2011, 4-108.)

Eristeiden alapuolinen korroosio tulee yleensä ongelmaksi, kun putkiston tai laitteiden sisällön operointilämpötila on alle 121 °C. Kyseisellä lämpötila-alueella olosuhde ei ole tarpeeksi kuuma pitämään ulkopintaa kuivana normaalin operoinnin aikana. (NACE International 2013, 1-36.)

CUI-vauriot esiintyvät kohteissa, joissa on havaittavissa vaurio eristepelleissä, höyrysuluissa, sääsuojissa, tiivistekitissä tai yhteissä, jotka lävistävät eristeet. Lisäksi virheellisesti asennetut eristepellit voivat johtaa veden pääsemiseen eristeiden alle. Putkistot, joiden höyrysaatot vuotavat tai ovat rikkoutuneet. Kohteet joihin pääsee luonnollisesti vettä ja haihtuminen on hidasta. Putkikannakkeet, tärisevät putkistot, venttiilit ja niiden sovitukset, höyrysaatot, eristeiden päätepisteet kuten laipat, pystyputket ja muut putkiston osat, ylöspäin olevat eristepeltien saumakohdat, hiiliteräs tai niukkaseosteiset

laipat ja pultiliitokset korkeaseosteisissa putkistoissa. Hiili- tai niukkaseosteisilla teräksillä vaurio näyttää samalta kuin galvaanisella korroosiolla. Sen jälkeen kun eriste on poistettu, niin CUI vauriot ovat usein nähtävissä hilseilevinä kerroksina. (API RP 571 2011, 4-108 ja 4-109.)

Eristetyille painelaitteille tarkastusta tulisi harkita, mikäli operointilämpötilat ovat -12 ja 175 °C välillä, sekä kun painelaitteen materiaalina on hiiliteräs tai niukkaseosteiset teräkset. Katkonaiselle painelaitteen käytölle ja austeniittisista ruostumattomista teräksistä valmistetuille painelaitteille vastaava kriittinen operointilämpötilavyöhyke on 60 – 205 °C. (API RP 572 2009, 29.)



Kuva 5 Lähikuva T-haarasta eristeet poistettuna (API RP 571 2011, 4-112.)

Tarkastussuunnitelma on harkittava kohteen käyttölämpötilan, tyypin, eristemateriaalin ja iän perusteella. Myös kohteen maalipinnan tyyppi, ikä ja CUI-vaurioiden tarkastushistoria, sekä eristetyn kohteen käyttöhistoria on otettava huomioon. Muita tarkastusten priorisointia auttavia toimenpiteitä ovat tiivistevaurioiden, nestevuotojen ja ruosteisten kohtien etsiminen. Tarkastus vaatii epäillyn alueen tai kaikkien eristeiden purkamisen. Jos eristepellit ovat hyvässä kunnossa ja oikein asennettu, niin todennäköisyys CUI-vaurioitumiseen on pienempi. Silti riski CUI-vaurioille on olemassa. Tavanomaisia paikkoja prosessiyksiköissä ovat todella kosteat alueet kuten, tuulen alapuolella olevat jäädytys tornit, höyryventtiilit, vesitys- ja sprinklerijärjestelmät ja happamien kaasujen tai jäädytysvesisuihkujen lähellä. Kun suunnitelman mukaisia tarkastuksia tehdään ja CUI-vaurioita löydetään, niin on syytä tarkastaa ympäriltä myös muita kohteen osia. Tarkastusmenetelminä kannattaa käyttää tapauskohtaisesti kustannustehokkainta lähestymistapaa, kuten:

- Osittainen tai täydellinen eristeiden poisto silmämääräiselle tarkastukselle (VT)
- Seinämän paksuuden tarkastus (UT)
- Reaaliaikainen röntgenkuva pienille putkistoille (RT)
- Neutronien takaisinsirona (Neutron backscatter) -tekniikat märkien eristeiden tunnistamiseksi
- Syväälle tunkeutuva pyörrevirtatarkastus (EC)
- Lämpökuvauus märän, vaurioituneen tai kokonaan puuttuvan eristeen etsimiseksi (API RP 571 2011, 4-110 ja 4-111.)

4.1.4 Suolaveden aiheuttama korroosio (Hydrogen Chloride & Hydrochloric Acid HCl Corrosion)

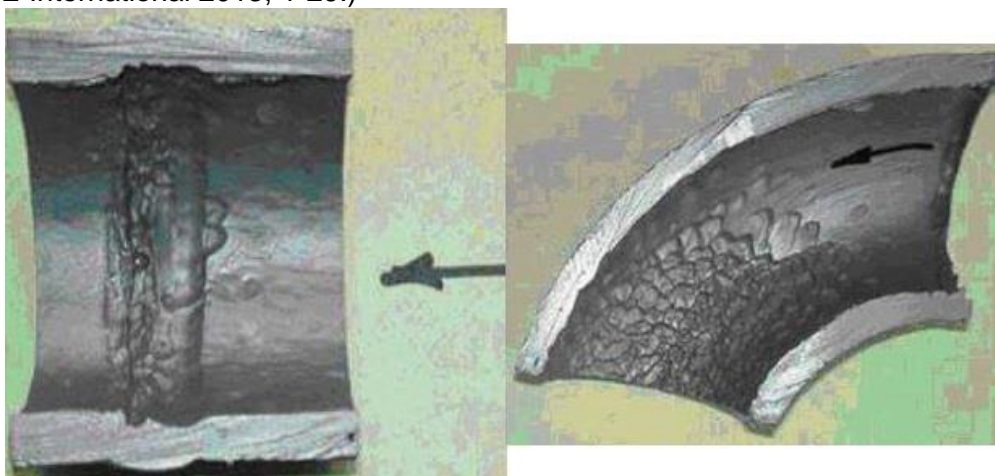
Kloridisuolat esiintyvät raakaöljyssä joko emulgoituneena veteen tai kiinteänä aineena. Korroosion aiheuttaa vetykloridin läsnäolo, joka kehittyy magnesium- ja kalsiumkloridien kuumentumisesta yli 149 °C:n lämmössä aina 426 °C lämpötilaan saakka. Kloorivedyn muodostumista esiintyy pääasiassa raakaöljyn esilämmitysuuneissa. Kuiva kloorivety ei ole syövyttävää hiili- tai niukkaseosteisille teräksille, etenkin kun mukana on suuria pitoisuuksia hiilivetyhöyryä tai -nestettä. Kuitenkin, jos höyryä lisätään raakaöljytornin pohjaan tislauksen helpottamiseksi, niin samalla tuotetaan laimeaa suolahappoa. Suolahappo voi aiheuttaa vakavia korroosiovaurioita hiilliteräksissä, kun lämpötila alittaa veden alkuperäisen kastepisteen. Korroosionopeus suurenee veden pH-arvon las-
kiessa. (NACE International 2013, 1-28.)

Suolahappo (HCl:n vesiliuos) aiheuttaa sekä yleisiä ja paikallisia korroosioita ja on hyvin aggressiivinen yleisimmille materiaaleille. Vauriot jalostamolla liittyvät useimmiten kastepiste korroosioon, jossa vettä sisältävät höyryt ja kloorivety tiivistyvät tislauks-, fraktiointi- tai strippaustorniin. Suolahappoa esiintyy raakaöljyn tislauks- ja fraktiointitornin yläosassa vesipisaroina jotka ovat kondensoituneet vesihöyrystä tornin huipulla. Kyseenomainen suola-
vesi saattaa olla erittäin hapanta ja voi johtaa aggressiiviseen korroosioon putkistoissa, lämmönvaihtimien kuorissa, putkisarjoissa, päätykupeissa ja sidetangoissa (cold dead legs). Reformointiyksikön katalyyttiin syötetään orgaanista kloridiyhdistettä, jota saattaa irrota katalyytistä reformoinnin tuotevirtoihin. Tällöin ne reagoivat muodostaen suolahappoa, joka kulkeutuu jätevetenä eri yksiköiden läpi, kuten syöttö ja esilämmitys lämmönvaihtimien läpi. (API RP 571 2011, 5-16.)

Korroosiota löytyy paikoista, joissa kuivia klorideja sisältävät virrat sekoittuvat vesivirtojen kanssa tai kohteista, joissa vesivirrat jäädytetään alle kastepisteen. Todisteita ohentumille löytää käyttämällä automaattista ultraääniskannausmenetelmää (UT) tai profiilin röntgenkuvausta (RT). Prosessin ja ohenemisen seuraaminen ovat tärkeitä tapoja korroosion seuraamusten minimoimiseksi. Strategisesti oikein sijoitetuilla korroosioantureilla voidaan seurata tehokkaasti korroosion etenemistä ja vaurion laajuutta. (API RP 571 2011, 5-17 ja 5-18.)

4.1.5 Ammonium bisulfidi (NH₄HS)

Ammoniumbisulfidi on vahva syövyttävä aine, joka muodostuu orgaanisia typpi- ja rikkiyhdisteitä sisältävien hiilivetyjen vetykäsittelyssä ja -krakkauksessa. NH₄HS voi aiheuttaa vakavaa korroosiota hiiliteräksille. Todella turbulenttinen ja nopea virtaus kiihdyttää korroosion etenemistä. Mikäli prosessiveden pH on yli 8, niin hiiliteräs putket eivät normaalisti syövy rautasulfidikalvon muodostumisen johdosta. Nopea ja turbulenttinen virtaus voi kuitenkin rikkoa kalvon, jonka myötä korroosionopeus kasvaa hyvin suureksi. (NACE International 2013, 1-29.)



Kuva 6 Vaurioituneen 2” mutkan poikkileikkaus hapanvesilinjasta (API RP 571 2011, 5-12.)

Korroosio aiheuttaa yleistä ohenemista hiiliteräksillä ja turbulenttisten virtausten olosuhteissa erittäin suuria paikallisia ohenemia. Matalat virtausnopeudet saattavat aiheuttaa paikallisia ohenemia suolojen saostuessa. Lämmönvaihtimet voivat menettää tehoa tukkeutumisen takia. Tarkastussuunnitelma olisi tehtävä huolellisesti prosessi- ja materiaali/korroosio-asiantuntijoiden kanssa, jotta voidaan määritellä tiettyjen prosessialueiden haavoittuvuus korroosiolle. NH₄HS pitoisuuksia pitää selvittää näytteiden avulla. Usein

toteutettavat UT-tarkastukset ja/tai profiilin röntgen kuvantaminen korkean ja matalan virtausnopeuden alueilla. UT-menetelmä säätöventtiileille, joissa on suuria NH₄HS-pitoisuuksia. IRIS-, RFEC- ja flux leakage -tekniikoita suositellaan teräksisille ilmanjäähdytysputkille. Pyörrevirtatarkastus on suositeltu ei-magneettisille ilmanjäähdytysputkille. Virtausmittareiden toimivuuden varmistaminen on hyvin tärkeää virtausten seurannassa. (API RP 571 2011, 5-10.)

4.1.6 Korkean lämpötilan rikkikorroosio (HTSC)

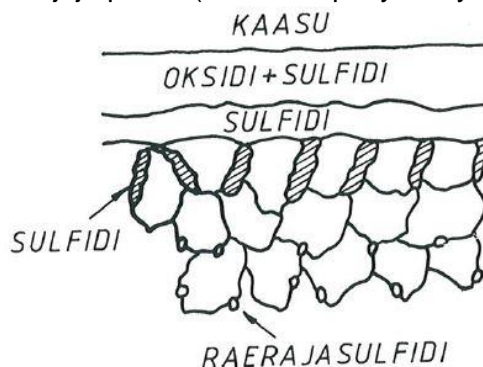
Korkealämpötila rikkikorroosiota tapahtuu 200–500 °C:n lämpötilassa, kuivassa ympäristössä. Korroosioreaktiossa metalliseoksen seosaineet reagoivat rikkiyhdisteiden kanssa muodostaen korroosiotuotteena metallisulfideja. Rikkivety on kaikista voimakkain yhdiste aiheuttamaan korroosiota. (Hucińska 2006, 16-17.)

Metallin pinnalle hapettavassa kaasuatmosfäärissä oksidikerroksen muodostumisnopeus riippuu hapen kulkunopeudesta metallioksidikerroksen läpi. Oksidikerroksen muodostuttua korroosion jatkuminen edellyttää, että joko ionit ja elektronit tai happi tai metalliatomit kulkeutuvat oksidikerroksen läpi. Korkeassa lämpötilassa tapahtuva sulfidikorroosio vedyn ja rikkivedyn läsnä ollessa on kriittisempi kuin ilman vetyä. Vety muuntaa orgaaniset rikkiyhdisteet rikkivedyksi ja korroosiota alkaa ilmenemään suhteessa sitä enemmän, mitä suurempi rikkivedyn pitoisuus on. (NACE International 2013, 1-40.)

Rikki tai rikkiyhdisteet voivat diffundoitua rikkipitoisessa ympäristössä oksidikerroksen läpi ja muodostaa metallisulfidia, joka huonontaa korroosionkestävyyttä. Sulfidikerros muodostuu pelkistävässä olosuhteissa ja on yleensä helposti hilseilevä ja huokoinen. Kaasun muodostuminen käytännössä vaihtelee, toisinaan muodostuu sulfidia ja toisinaan oksidia. (Aromaa 2005, 91.)

Samanaikaiset oksidi- ja sulfidikerrosten esiintyvät todennäköisimmin rikkipitoisen kaasun kulkeutuessa halkeamien kautta metallipinnoille. Rikki voi kulkea oksidikerroksen läpi ja muodostaa metallisulfidia oksidikerroksen ja metallin pinnan väliin ja jopa metallin sisälle raerajoihin. (Kunnossapitoyhdistys 2004, 150.)

Kuvassa 7 hapetetussa kromiseoksessa sulfidi esiintyy savukaasussa, jossa sulfidi tunkeutuu metallin sisään raerajoja pitkin. (Kunnossapitoyhdistys 2004, 151.)



Kuva 7 Sulfidin tunkeutuminen metallin sisään (Kunnossapitoyhdistys 2004, 151.)

Rikkivetyä sisältävissä virtauksissa vedyn läsnäolo lisää korroosiota korkean lämpötilan vaikutuksessa (yli 260 °C). Tämä sulfidoitumisen muoto johtaa yleensä tasaiseen materiaalin ohenemiseen kuumissa vetyä käsittelevissä yksiköissä. (NACE International 2013, 1-40.)

Korroosionmuoto esiintyy korkeissa lämpötiloissa toimivissa putkistoissa ja laitteissa, joissa sisältönä virtaa vetyä tai rikkivetyä. Tällaisia kohteita ovat vetyä käsittelevät yksiköt kuten rikinpoisto-, hydraus- ja vetykrakkausyksiköt. Riippuen prosessiolosuhteista, korrosio on yleensä tasaista sisäpuolista ohenemista tai kovissa virtausolosuhteissa eroosikorroosiota. (API RP 571 2011, 4-160.)

Korroosionopeus riippuu enimmäkseen vetypitoisuudesta, lämpötilasta ja materiaalin kromipitoisuudesta. Korrosio näkyy tasaisena sisäpuolisena ohenemisena ja rautasulfidihilseen muodostumisena. Hilsettä muodostuu viisi kertaa materiaalin ohenemisen verran useina kerrostumina. Tiiviisti kiinnittynyt kiiltävän harmaa pinta voidaan virheellisesti tulkita alkuperäisessä kunnossa olevaksi materiaaliksi. (API RP 571 2011, 5-19.)

Kuvassa 8 on esimerkkinä ohentunut raakaöljy-yksikön hiiliteräksinen putki kahden vuoden käytön jälkeen. Vasemmalla puolella alkuperäisen putken seinämävahvuus ja oikealla ohentunut, käytössä ollut putki. (API RP 571 2011, 4-164.)

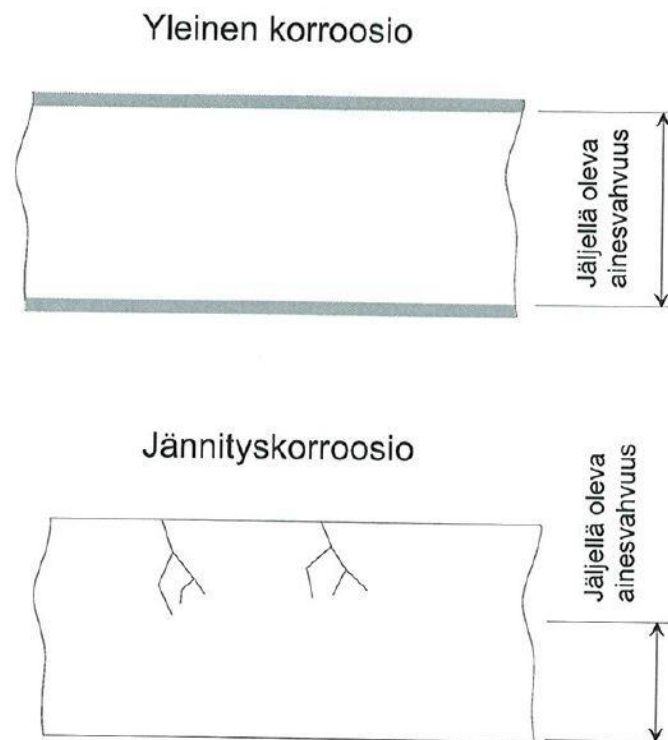


Kuva 8 Alkuperäinen ja kulunut 9Cr-1Mo putki (API RP 571 2011, 4-164.)

Todelliset käyttölämpötilat on syytä tarkistaa ja verrata suunniteltuihin käyttöarvoihin. Prosessia on seurattava säännöllisesti ja varmistettava ettei rikkivetytitoisuudet merkittävästi lisäänty. Materiaalin ohenemisen seuraamiseen käytetään UT, VT, ja RT -menetelmiä. (API RP 571 2011, 5-19 ja 5-20.)

4.2 Jännityskorroosio (SCC)

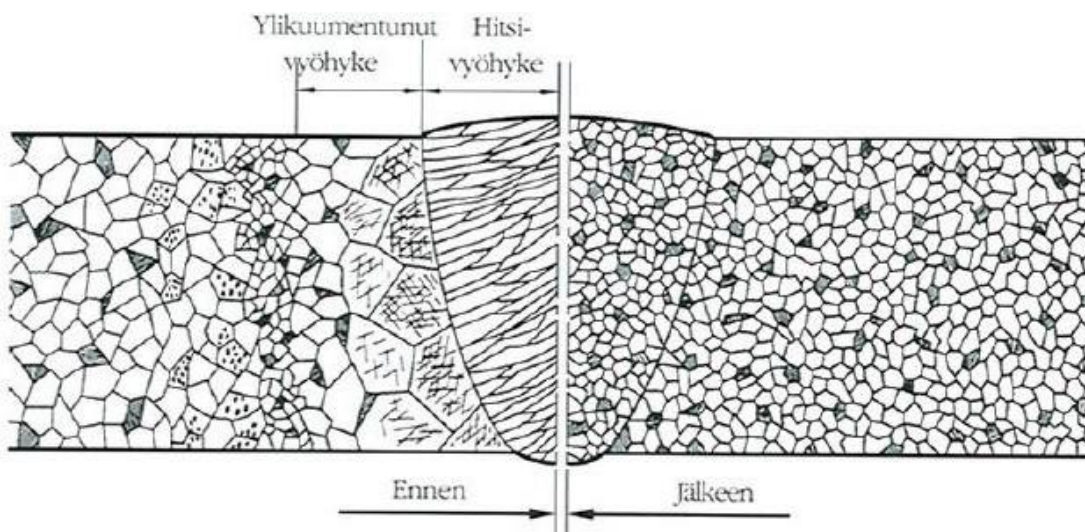
Syövyttävä korroosioympäristö ja metallin pinnassa vaikuttava vetojännitys ovat edellytyksenä jännityskorroosio. Metallin on oltava suurimmalta osaltaan passiivissa tilassa tai metallin ja syövyttävän aineen välillä on oltava suojakerros. Tavallisesti jännityskorroosiota ilmenee muun muassa seuraavilla ympäristö-materiaalipareilla: ruostumattomat teräkset-kloridiliuos ja hiiliteräs-lipeäliuos. Yleistä korroosiota on yleensä vähän ja sen takia jännityskorroosiomurtuma on miltei aina yllättävä vaurio. Murtuma pääsee alkamaan, kun suojakerros tuhoutuu paikallisesti ja syntyy pieni anodinen alue, joka voi jatkossa toimia murtuman ytimenä tai passivoitua uudelleen. Jännityskorroosiolla on tietty ydintymisaika, jolloin metallin pintaan alkaa muodostua säröjen alkuja ja korroosiovaurioita. Säröjen kasvaessa rakenne lopulta tuhoutuu mekaanisen murtuman tavoin, tyypillisesti haurasmurtuman kaltaisesti. Jännityskorroosion säröt ovat näin ollen heikentäneet metallia siihen pisteeseen saakka, missä se ei kestä enää kuormitusta. (Aromaa 2005, 76.)



Kuva 9 Ainevahvuuden menetyksen vakavuuden vertaaminen (Jari Aromaa 2005, 77.)

Kappaleen pinnassa oleva vetojännitys on jännityskorroosiomurtuman vaativa voima, joka voi olla käyttöjännitystä tai materiaalin sisäistä jäännösjännitystä esimerkiksi kylmämuokkauksen tai lämpökäsittelyn seurauksena. Syövyttävässä ympäristössä jännitykset keskittyvät muun muassa kappaleen pinnalla oleviin pistesyöpymiin, rakokorroosiovaurioihin tai syöpyneille raerajoille. Teräksillä epäpuhtauksien kertyminen tiettyihin osiin mikrorakennetta aiheuttaa jännitysten keskittymisen. (Aromaa 2005, 78.)

Kuvassa 11 on nähtävissä hitsauksen aiheuttaman seostamattoman hiiliteräksen mikrorakenteen koon muutos lämpömuutosvyöhykkeellä (HAZ). (Witting, Pettinen 2014, 85.)



Kuva 10 Lämpökäsittelyn vaikutus mikrorakenteeseen (Witting, Pettinen 2014, 85.)

Vasemmalla puolella materiaali lämpökäsittämättömänä, josta havaitaan raekoon kasvu karkearakeiseksi hitsin läheisyydessä. Oikealla puolella lämpökäsittelyn jälkeen raekoko on kauttaaltaan pienentynyt, jolloin hitsin lujuus ja sitkeys paranevat. (Witting, Pettinen 2014, 85.)

4.2.1 Kloridien aiheuttama jännityskorroosio (CISCC)

Kloridijännityskorroosiota eli säröilyä ja halkeilua aiheutuu vesi- ja kloridipitoisessa ympäristössä vetojännityksen ja lämpötilan vaikutuksesta. Myös hapen liukeneminen metalliin lisää alttiutta halkeilulle. (API RP 571 2011, 4-184.)

Kloridit ovat suolahapossa olevia suoloja. Kloridia on runsaasti muun muassa merivedessä, jota käytetään teollisuudessa esimerkiksi jäähdytysvetenä. Kloridi edistää korroosiota lisäämällä elektrolyytin johtokykyä, kuten muutkin suolat. Kloridi vaikuttaa jännityskorroosion käynnistymiseen, kun metallin potentiaali on lähellä aktiivista/passiivista aluetta. (Kunnossapitoyhdistys 2004, 408.)

Tavallisimmin CISCC esiintyy austeniittisissa teräksissä. Otollisin ympäristö korroosiolle on vetinen, jossa on matala pH-arvo lämpötila-alueen ollessa 54 – 79 °C. Erityisen alttiita kloridijännityskorroosiolle ovat 18 % kromia ja 8 % nikkeliä sisältävät ruostumattomat

teräkset. Todella alhaisetkin kloridipitoisuuden voivat johtaa säröilyyn. (NACE International 2013, 1-49 ja 1-50.)

Voimakkaassa jännityksessä olevat tai kylmämuokatut osat, kuten esimerkiksi palkeet ovat alttiita jännityskorroosiolle. Materiaali on sitä vastustuskykyisempi korroosiota vastaan, mitä suurempi sen nikkelpitoisuus on. Yli 35 % nikkeliä sisältävät teräkset ovat erinomaisia ja yli 45 % sisältävät lähes immuuneja kloridijännityskorroosiolle. Kaikki 300SS-sarjan materiaalista valmistetut putkistot ja painelaitteet kaikissa prosessiyksiköissä ovat alttiita kloridijännityskorroosiolle. Säröilyä on havaittu vesijäähdytteisissä lauhduttimissa ja prosessin raakaöljykolonnien ylimeno lauhduttimissa (crude tower overhead condenser), sekä höyrykattiloiden tyhjennyslinjoissa. CISCC esiintyy myös CUI-vaurioissa eristemateriaalin ollessa märkä. Tunnusmerkkinä vaurioille voi pitää visuaalisesti nähtäviä halkeamia ja säröjä sisä- tai ulkopuolella. Materiaalissa ei yleensä näy silmännähtäviä viitteitä ennen kuin säröt tai halkeamat ovat jo syntyneet. Säröjen pinnat ovat yleensä ulkonäöltään haurasmurtuman kaltaisia. (API RP 571 2011, 4-184 ja 4-185.)



Kuva 11 Ulkopuolista säröilyä ja halkeilua eristeidenalaisessa 304SS-tyypin teräsputkessa (API RP 571 2011, 4-187.)

Tehokkaina tarkastusmenetelminä kloridijännityskorroosion havaitsemiseksi voidaan käyttää visuaalista-, tunkeumaneste- ja pyörrevirtatarkastusta. Pyörrevirtatarkastus on suositeltava menetelmä painelaitteille, jäähdyttimille ja niiden putkistoille. Todella pienien säröjen havaitseminen voi olla haasteellista pintatarkastusmenetelmillä, jolloin voi olla

tarpeen kiillottaa tai korkeapainepestä tarkastettava pinta. Yleensä korkeapaineiset painelaitteet vaativat kyseisiä toimenpiteitä. Säröjä voi havaita myös UT-menetelmillä. (API RP 571 2011, 4-185.)

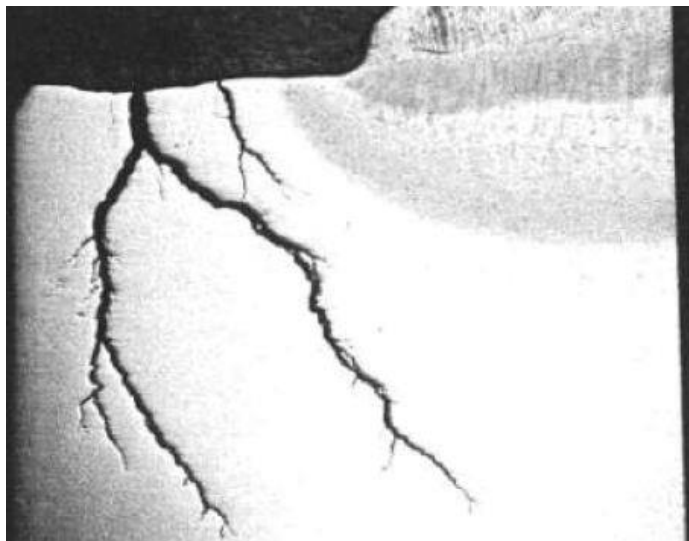
4.2.2 Alkaalien aiheuttama jännityskorroosio (ASCC)

Säröily amiinien vaikutuksesta on yksi muoto alkaliin aiheuttamasta jännityskorroosiosta ja kyseessä on eräänlainen emäksinen jännityskorroosio. Korroosio aiheutuu kosteassa alkalisessa ympäristössä materiaalin ollessa vetojännityksen vaikutuksen alaisena. (API RP 571 2011, 5-55.)

Alkaliin aiheuttama jännityskorroosio esiintyy yleensä ferriittisillä ja austeniittisilla teräksillä. Teräksien jäännösjännitykset ovat kriittisiä korroosion muodostumiselle, joten lämpökäsittelyt ovat todella tärkeitä korroosion välttämiseksi. Säröilyn kehittymiseen vaikuttaa sisällön emäksisten yhdisteiden pitoisuus, joiden ollessa 50–100 ppm on riittävä säröilyn kehittymiseen. Vaihtuvat märät ja kuivat olosuhteet kiihdyttävät emäksistä jännityskorroosiota kuten CISCC:ssä, mutta ASCC ei tarvitse hapen läsnäoloa säröilyn muodostumiseen. Kaikki lämpökäsittämättömät hiiliteräksiset laitteet ja putkistot amiinikäytössä ovat alttiita ASCC:lle. (NACE International 2013, 1-50.)

Vauriot on havaittavissa putkiston tai laitteen sisäpuolisen perusaineen pinnan säröilynä, hitsien ympärillä kuumina olleilla alueilla. Säröilyä on myös havaittu hitseistä ja viereisistä alueista jotka ovat olleet jännityksen alaisena. Yleensä säröt muodostuvat hitsien rinnalle, mutta voivat olla myös hitsausaumassa niiden suuntaisesti tai poikittain. (API RP 571 2011, 5-55.)

Kuvassa 13 on mikroskooppikuva lämpökäsittämättömän hitsin poikkileikkauksesta putkessa, jossa säröily on edennyt syväälle perusaineeseen. (API RP 571 2011, 5-59.)



Kuva 12 Mikroskooppikuva hitsin poikkileikkauksesta (API RP 571 2011, 5-59.)

Säröt voidaan havaita silmämääräisenä tarkastuksena, mutta parhaita menetelmiä vaurioiden löytämiseksi ovat WFMT- ja ACFM-tekniikat. Pinta joudutaan valmistelemaan teräsräpuhdistamalla tai korkeapainepesulla WFMT-menetelmän käyttämiseen, mutta ACFM-menetelmää käyttäessä pinnan käsittely ei ole välttämätöntä. Pintatarkastusmenetelmät eivät yleensä ole kovin tehokkaita ahtaiden ja kerrostumia sisältävien säröjen löytämiseen, joten niitä ei suositella. Säröjen syvyyttä voidaan mitata ultraäänitekniikoilla, kuten SWUT-menetelmällä. AET-menetelmällä voidaan seurata säröjen kasvua ja paikantaa kasvavia säröjä. (API RP 571 2011, 5-56.)

4.2.3 Polytionihappojännityskorroosio (PASCC)

PASCC ilmenee austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä, jotka ovat polytionihapon ja jännitysten vaikutuksen alaisina. Austeniittisten ruostumattomien terästen herkistyminen altistaa PASCC:lle. Polytionihappo muodostuu metallin pintaan kosteuden, hapen ja metallisulfidien vuorovaikutuksesta. Kaikki ne voivat olla läsnä pysäytyksen yhteydessä laitteissa, jotka sisältävät metallisulfidikalvon. (NACE International 2013, 1-52.)

Pysäytykset, käynnistykset ja operointi ilman kosteuden läsnä ollessa ovat kriittisimpiä hetkiä tämän korroosiotyyppin muodostumiselle. Säröily johtuu rikkihapon muodostumisesta sulfidin, ilman ja kosteuden reagoidessa herkistyneen austeniittisen ruostumatto-

man teräksen kanssa. Säröytymisaika seinämän paksuuden lävitse saakka voi olla nopeaa, tunneista jopa minuutteihin. Useimmiten vauriot esiintyvät hitsien läheisyydessä ja korkeiden jännityksien alueille. (API RP 571 2011, 5-49.)

Kaikki yksiköt joissa on käytetty herkistymiselle alttiita teräksiä ja jotka operoivat rikki-
toisessa ympäristössä ovat alttiita PASCC:lle. Tyypillisesti vaurioituneet laitteet ovat lämmönvaihtimien putkisarjat, sekä uunien tuubit ja putkistot. Vauriot ovat tavallisesti hyvin paikallisia ja saattavat ilmetä vasta laitteiden käynnistyksen yhteydessä tai operoinnin aikaisina vuotoina. Säröt muodostuvat usein teräksen raerajoille ja etenevät niitä pitkin. (API RP 571 2011, 5-50.)

Tunkeumanestetarkastusta voidaan käyttää PASCC:n etsimiseen. Todella hienojen ja ahtaiden säröjen kohdalla voi joutua hiomaan pintaa tunkeuman parantamiseksi. Vaurioiden tarkastus on haasteellista, koska ne saattavat muodostua vasta laitteiden pysäytyksen aikana. Vaurioiden etenemistä ei tavallisesti pysty seuraamaan operoinnin aikana. (API RP 571 2011, 5-50.)

4.3 Vetyvauriot

Metallien ja metalliseosten sitkeys huonontuu vedyn päästessä tunkeutumaan materiaaliin. Kun vetyä kehitty kappaleen pinnalla, niin osa vedystä voi diffundoitua materiaalin metallihilaan. Osapaineen kasvettua metallin pinnalle riittävän suureksi vety alkaa tunkeutua materiaalin pinnan läpi. Vauriot syntyvät, kun vain atomaarinen vety liikkuu hiilassa, joilloin metalli haurastuu vedyn kulkeutuessa dislokaatioihin tai vedyn kerääntyessä sulkeumien ympärille. Materiaalin rakenne, ympäristö, osapaine, sekä lämpötila vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti vety kulkeutuu materiaalin metallihilaan. Vetyä kulkeutuu sitä enemmän metallihilaan, mitä korkeampi on vedyn osapaine ja matalampi lämpötila on. Metalliin tunkeutuva atomaarinen vety voi olla peräisin muun muassa pinnalla tapahtuvasta korroosioreaktiosta tai pinnoitusprosessista. Jännitystila vaikuttaa olennaisesti vedyn aiheuttamiin vaurioihin. Dislokaatioihin kertynyt vety estää niiden liikkeen, jolloin metallin kuormittuessa se ei pysty muokkautumaan vaan murtuu. Mitä suurempi teräksen lujuus on, niin sitä enemmän vedyn aiheuttamia vaurioita ilmenee. Vety aiheuttaa halkeamia kappaleeseen kohtisuoraan ulkoista jännitystä vastaan ja kun halkeamiin kertyy vetyä, niin kaasun paine muodostaa halkeamien kasvun, joka taas joutaa rakenteen murtumiseen. (Aromaa 2005, 83.)

Vedyn imeytymistä kiihdyttävät myös ns. vetymyrkkyjen läsnäolo korroosiotapahtumassa. Kyseisiä vetymyrkkyjä ovat muun muassa antimoni (Sb), arseeni (As), hiilimonoksidi (CO), seleeni (Se), syaanivety (HCN), rikkivety (H₂S) ja niiden yhdisteet happamissa liuoksissa. Rikkivety on näistä vaarallisin vedyn aktivoija, jonka aiheuttamaa jännitysmurtumaa kutsutaan sulfidijännityskorroosioksi. (Kunnossapitoyhdistys 2004, 190.)

”Wet H₂S Cracking” on yksi määrittämissä rikkivety ympäristöissä esiintyvä vetyvauriotyyppi. Rikkivety on suhteellisen miedosti käyttäytyvä korroosion aiheuttaja hiiliteräksille ja yleisen korroosion muodostuminen on vähäistä. Korroosioprosessin aikana voi kuitenkin vapautua huomattavia määriä vetyä, jolla voi olla merkittäviä haitallisia vaikutuksia hitsatuille painelaitteille ja niiden varusteille. Yleisesti vetyvauriot ovat tavallisia jalostamon laitteissa, joiden prosessiolosuhteet sisältävät vettä jossa on enemmän kuin 50 ppm rikkivetyä lämpötilavälillä 20–149 °C. Pitkittäis- ja spiraalisauomoilla hitsatut putkistot ovat erityisen alttiita vetyvaurioille. Saumattomiin, valettuihin ja taottuihin putkiin ei yleensä tule rikkivedyn aiheuttamia säröjä tai kuplia, jos hitsaussaumojen kovuuden käsittelystä on pidetty huolta. (NACE International 2013, 1-53 ja 1-54.)

Kaikki rikkivetyvauriot teräksissä liittyvät vedyn imeytymiseen ja läpäisemiseen. Pienin vedyn läpäisy- tai diffuusionopeus on havaittu olevan pH-arvossa 7. Nopeudet lisääntyvät arvon noustessa tai laskiessa. Syaanivedyn (HCN) läsnäolo vesifaasissa lisää läpäisevyyttä merkittävästi kun pH-arvo on korkea. Alttius jännityskorroosiomurtumille kohtaa rikkivedyn osapaineen ollessa yli 300 Pa, vetolujuuden ollessa yli 620 MPa tai kun hitsauksesta syntyneen muutosvyöhykkeen (HAZ) kovuus on yli 237 HB. Kovuus on yleensä pääasiallinen ongelma jännityskorroosiomurtumien syntymiselle ja suositus hitsien kovuudelle onkin <200 HB. (API RP 571 2011, 5-61.)

Rakkuloita ja muita HIC-vaurioita voi kuitenkin kehittyä ilman jännitysten vaikutusta, joten lämpökäsittelyt eivät takaa niistä välttymistä. Lämpökäsittelyt ovat kuitenkin tehokas tapa poistamaan jäännösjännityksiä ja vähentämään kovuutta, jotka kiihdyttävät SOHIC- ja muiden kyseisten vaurioiden kehittymistä. Vetyrakkulat ja muut HIC- ja SOHIC-vauriot ovat yhteydessä myös teräksen valmistuksen aikaisiin virheisiin kuten laminaarisuuteen. Potentiaalisia yksiköitä vetyvaurioille ovat vetykäsittely-yksiköt, joissa ammoniumbisulfidin pitoisuus on yli 2 %. Jännityskorroosiomurtumia löytyy useimmiten kovista hitseistä ja niiden muodonmuutosalueista (HAZ), sekä kovista komponenteista kuten pultit, venttiilien jouset, 400SS-sarjan venttiilien säätölevyt, kompressorien akselit, luistit ja jouset. (API RP 571 2011, 5-62.)

Taulukko 1. Suositellut tarkastustekniikat vetyvaurioille (API 571, 5-63.)

| Vauriomekanismi | Tarkastustekniikka |
|-------------------------------|---|
| SCC | UT, kuten SWUT erityisesti volumetrisessa tarkastuksessa ja särön koon määrittämisessä. |
| HIC, SOHIC ja vetyrakkulointi | VT näkyvien halkeamien ja rakkuloiden havaitsemiseen, muuten parhaita tekniikoita ovat WFMT, EC, RT, ACFM. AET Säröjen kasvun seuraamiseen. |

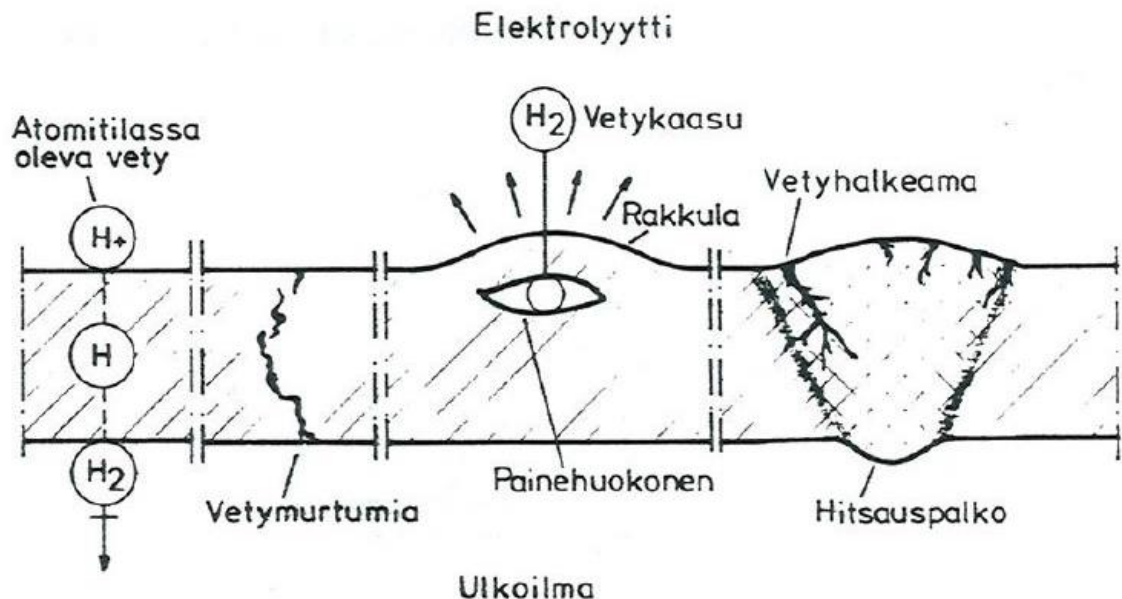
4.3.1 Vedyn aiheuttamat säröytymismekanismit (HIC & SOHIC)

Termit ”hydrogen embrittlement”, ”hydrogen induced cracking” ja ”hydrogen stress cracking” ovat usein käytettyjä HIC- ja SOHIC-vaurioille. Vaurio syntyy jatkuvan- tai jäännös jännitysten ja vedyn läsnäolon aiheuttamana, jotka saattavat johtaa katastrofaaliseen haurasmurtumaan ollen erittäin vaarallinen nopean kehittymisensä vuoksi. Vetyhauraus on samankaltaista kuin jännityskorroosio, siinä suhteessa, että normaalisti sitkeästi käytettyvä materiaali altistuu haurasmurtumalle vetojännityksen ja syövyttävän ympäristön seurauksena. (Callister, Rethwisch 2015, 662.)

Vetyhaurastuminen on ongelma korkealujuuksisille ferriittisille ja martensiittisille rautapohjaisille metalleille. Vaihteleva jännitystila ja materiaalin muokkaaminen edistävät vetyä sisältävän metallin murtumista. Vetyä jää metalliin lämpötila-alueella -20–70 °C, jolloin se voi aiheuttaa murtumia. Vety pääsee herkkäliikkeisyytensä ansiosta poistumaan teräksestä yli 150 °C lämpötilassa ja lujuus palautuu, mikäli sitä ennen se ei ole ehtinyt yhtyä H₂-kaasuksi metallin sisällä, josta vauriot aiheutuvat. (Kunnossapitoyhdistys 2004, 191.)

HIC-vauriot muodostuvat ilman rakenteen jännitysten vaikutusta vetyrakkuloiden muodostumisen yhteydessä, johon liittyy yleensä teräksen puhtauteen ja sitä kautta valmistukseen liittyvät virheet. Epähomogeeniset, pitkät sulfidi- tai oksidisulkeumat, jotka esiintyvät rinnakkain levyn valssaussuuntaan nähden ovat yleensä yhteydessä HIC-vaurioihin. Kyseiset sulkeumat yleensä kasvavat ja lopulta yhdistyvät portaittain havaittaviksi halkeamiksi, jolle on oma terminsä ”stepwise cracking”. Teräksessä esiintyvien epäpuhauksien kuten esimerkiksi rikin rajoittamisella voidaan ehkäistä vaurioiden syntymistä. (NACE International 2013, 1-57.)

SOHIC-vauriot löytyvät painelaitteista yleensä hitsien läheisyydestä. SOHIC-vauriot ovat yleensä samankaltaisia kuin HIC-vauriot, mutta yleensä pahempia ilmeten halkeamaryhminä päällekkäin toisiinsa nähden. Voimakkaiden jatkuvan tai jäännösjännitysten seurauksena aiheutuu paksuussuunnassa olevia halkeamia ja säröjä. Yleensä vauriot ilmaantuvat HAZ-vyöhykkeelle ja viereisille alueille, joissa voi olla myös muita HIC-vaurioita, säröjä tai vikoja kuten rikkivetyhalkeamia. (API RP 571 2011, 5-60.)



Kuva 13 Rakkuloiden ja vetyhaurastumisen muodostuminen (Kunnossapitoyhdistys 2004, 190.)

SSC on vetyhaurauden muoto, jota esiintyy säröilynä korkealujuuksisissa teräksissä ja hitsien läheisyydessä (HAZ) jännitteisissä osissa alle 82 °C lämpötilassa. Teräksen alttius SSC-vaurioille on riippuvainen sen seosaineista, mikrorakenteesta, lujuudesta ja siihen kohdistuneista jännityksistä. (NACE International 2013, 1-56.)

SSC esiintyy matalalämpöisessä ja märässä ympäristössä, jolle ovat alttiita yleensä reaktorit, putkistot, uunit, ja lämmönvaihtimet vetyinjektiolinjan alapuolella. (Hucińska 2006, 18). Sulfidikorroosioprosessin aikana atomaarinen vety imeytyy metallin pinnan läpi ja aiheuttaa säröilyä, joka voi olla hyvinkin paikallista etenkin alueilla joiden kovuus on korkea, kuten esimerkiksi hitseissä. Lämpökäsittely (PWHT) vähentää kovuutta ja jäännösjännityksiä ehkäisten SSC-vaurioiden syntymistä. SSC-vaurioita voidaan yleensä välttää rajoittamalla hitsien kovuutta enintään arvoon 200 HB esilämmityksen, hitsausmenetelmien ja lämpökäsittelyn avulla. (API RP 571 2011, 5-60.)

Prosessimuutoksilla voidaan vaikuttaa vaurioiden muodostumiseen, kuten pH ja vesifaa- sin ja/tai ammoniakin tai syanidin pitoisuuksien muutoksilla. Tarkastus vetyvauriolle yleensäkin keskittyy hitseihin. Koska seuraukset kyseisistä vaurioista voivat olla vakavia, niin jalostamoilla on yleensä oma tarkastusohjelma kyseisille vaurioille, jonka avulla voi- daan priorisoida tarkastuksia kyseisille vaurioille. (API RP 571 2011, 5-63.)



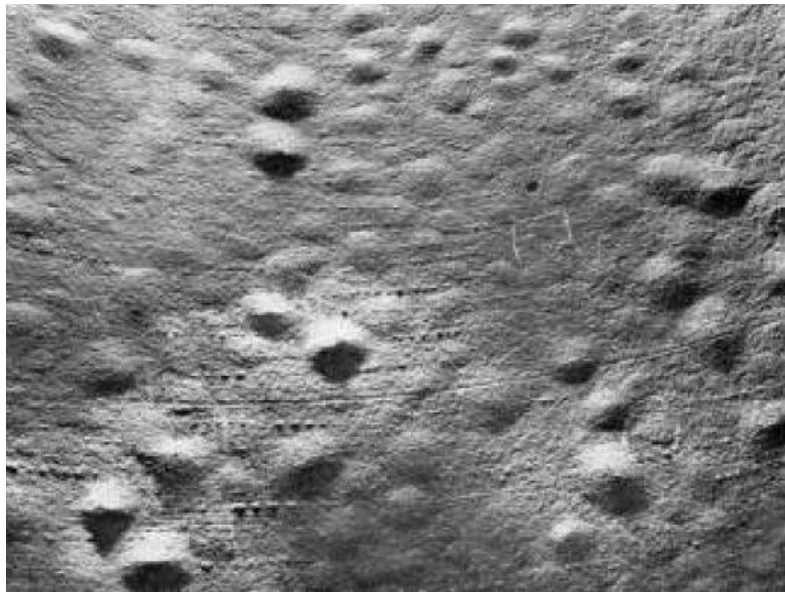
Kuva 14 Mikroskooppikuva HIC-vaurion luonteesta porrasmaiseen, vaiheittaiseen hal- keiluun (API RP 571 2011, 5-67.)

Paineenalaisissa kohteissa SOHIC- ja SSC-vauriot ovat yleensä hitsien läheisyydessä. SSC-vaurioita voi löytyä myös erityisen kovista materiaaleista. Vaurioiden ehkäise- miseksi voidaan käyttää HIC-vaurioille vastustuskykyisempiä teräksiä ja hitsauksen jäl- keistä lämpökäsittelyä (PWHT). Lämpökäsittely ei estä vaurioita kokonaan, mutta ehkäi- see rakkuloiden ja muiden HIC-vaurioiden syntymistä jäännösjännitysten poistamisella, jotka saattaisivat edistää säröjen ja halkeamien syntymistä. (API RP 571 2011, 5-62 ja 5-63.)

4.3.2 Vetyrakkulointi (Hydrogen Blistering)

Vetykuplat ovat ongelma matalalujuuksisille teräksille, joissa on paljon epäpuhtauksia ja sulkeumia. Vetykuplat muodostuvat atomaarisen vedyn kerääntyessä rakennevirheisiin, joissa ne osin muodostavat vetymolekyylejä aiheuttaen metallin sisään suuren paineen, joka ylittää metallin myötölujuuden. Kuplat muodostuvat pinnalle tai syvemmälle metallin sisälle. (Aromaa 2005, 83.)

Eri ympäristöissä tarvittava vedyn osapaine vaihtelee suuresti eri metalleilla, useiden kymmenien baarien ylipaineesta lähes tyhjiöön. Vedyn paineen muodostuminen voi kestää ympäristöstä riippuen muutamasta sekunnista yli kymmenen vuotta vähitellen tapahtuvaan kerääntymiseen. Vetykuplissa molekyylit eivät voi liikkua metallissa vetyatomien tavoin, jolloin ne muodostavat vikakohdissa suuren kaasunpaineen. Paine voi olla satoja tai jopa tuhansia baareja. Tämän seurauksena mikrohuokokset suurenevat, lujuus alenee ja rakenne muuttuu haurasmurtumalle alttiiksi. Rakenne voi myös rikkoontua jo pelkän kaasupaineen aiheuttamien murtumisten takia. (Kunnossapitoyhdistys 2004, 189.)



Kuva 15 Laajamittaista vetyrakkulointia painelaitteen pinnalla (API RP 571 2011, 5-65.)

Vetykuplien aiheuttamia pullistumia voi aiheutua painelaitteiden ja putkistojen ulko- tai sisäpinnoille. Rakkuloita tuottava vety syntyy korroosion tuloksena, eikä siihen vaikuta prosessivirrassa mukana oleva vetykaasu. (API RP 571 2011, 5-60.) Harvinaisissa tapauksissa lämmönvaihtimista vaurioita voi löytyä putkisarjoista ja hitsisaumojen keski- osista. (API RP 571 2011, 5-62).

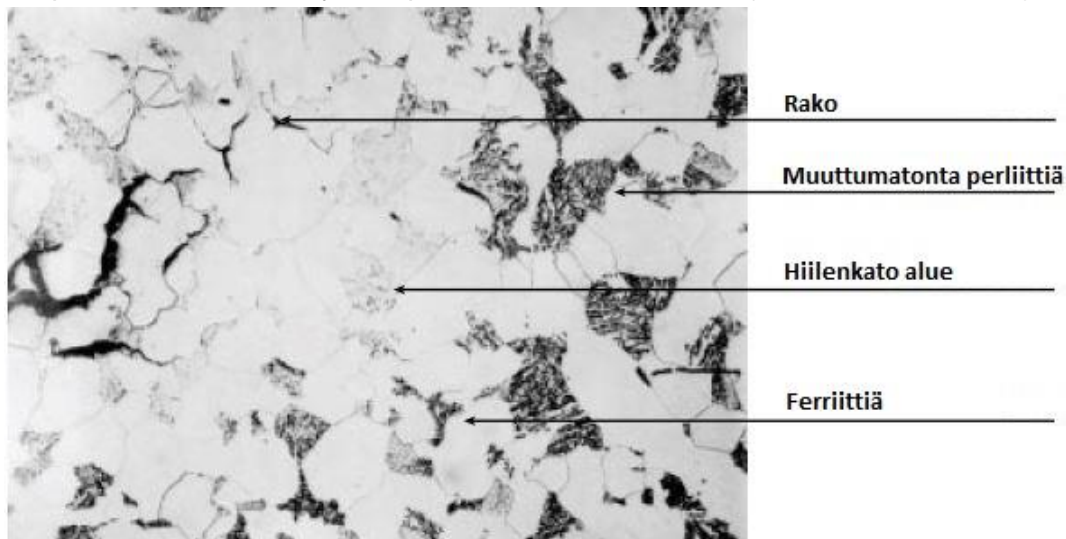
4.3.3 Korkealämpötila vetyhyökkäys (HTHA)

HTHA voi vaikuttaa teräsiin kahdella tapaa, joko pinnalla tapahtuvana hiilenkatona tai sisäisenä hiilenkatona ja rakoiluna johtaen lopulta säröilyyn. Sisäistä hiilenkatoa ja rakoilua tapahtuu, kun vety läpäisee teräksen ja reagoi hiilen kanssa muodostaen metaania joka ei pääse diffundoitumaan ulos teräksestä, vaan kertyy tyypillisesti raerajoille.

Tällöin tuloksena on korkeat paikalliset jännitykset, jotka johtavat rakojen, säröjen tai kuplien muodostumiseen teräksen sisälle. Matala lämpötila (kuitenkin yli 204 °C) ja korkean vedyn osapaine (yli 15,17 MPa) tuovat olosuhteen, joka suosii materiaalin sisäistä hiilenkatoa ja säröilyä, joka voi johtaa lopulta halkeiluun. Korkeissa lämpötiloissa ja matalassa vedyn osapaineessa kummatkin mekanismit ovat mahdollisia. (API RP 941 2016, 7-8.)

Pinnalla tapahtuva hiilenkato ilman halkeilua liittyy vedyn osapaineen ja lämpötilan aiheuttamaan olosuhteeseen, joka ei ole kuitenkaan tarpeeksi ankara tuottamaan halkeamia muodostavaa metaanipainetta. Pinnan hiilenkato on HTHA:n muotona samankaltainen kuin korkealle lämpötilalle ja kaasuille kuten ilmalle, hapelle tai hiilidioksidille altistuneella teräksellä. Tavallisesti vaikutukset pinnan hiilenkadolla ovat pieniä, paikallista lujuuden ja kovuuden heikkenemistä, sekä sitkeyden kasvua. Koska nämä vaikutukset ovat yleensä pieniä, niin huolta aiheuttaa usein enemmän teräksen sisäinen hiilenkato. (API RP 941 2016, 8.)

Kuvassa 17 mikrorakennäytteessä on sisäisen hiilenkadon ja halkeamien vaurioittama C-0.5Mo teräs. Materiaali on ollut katalyyttisessä reformointiyksikössä noin 65 000 tuntia lämpötilassa 421 °C vedyn osapaineen ollessa 2,9 MPa. (API RP 941 2016, 9.)



Kuva 16 Mikrorakenne kuva HTHA:lle altistuneesta teräksestä (API RP 941 2016, 9.)

Teräksen epäpuhtaudet, kuten kuonasulkeumat lisäävät taipumusta vetyrakkulavauriolle. Myös laminaarisuus on vakava ongelma rakkuloiden ja metaanin kertymisen kannalta. (API RP 941 2016, 8.)

Materiaalin sisäinen HTHA alkaa, kun korkeassa paineessa ja lämpötilassa oleva vety diffundoituu teräkseen ja alkaa reagoimaan hiilen tai karbidien kanssa. Hyökkäyksen alkuvaiheessa on periodi, jossa vaurioituminen on niin mikroskooppisen pientä, ettei sitä voida havaita nykyisillä NDE- ja metallografisilla tekniikoilla. Tämän lisäksi on myös aikaperiodi, jolloin ei tapahdu havaittavaa muutosta mekaanisissa ominaisuuksissa, mutta se on havaittavissa nykyisillä testausmenetelmillä. Kyseisen aikaperiodin jälkeen aineelliset vahingot ilmenevät vahvuuden, sitkeyden ja jäykkyuden menetyksinä. Tämä vaihtelee teräksen tyypistä ja altistumisen ankaruudesta riippuen. Vaurioituminen kestää vain muutamia tunteja ääriolosuhteissa ja ottaa taasen kauemmin aikaa alemmissa lämpötiloissa ja vedyn osapaineissa. Lievemmissä olosuhteissa vaurioita ei välttämättä havaita edes vuosien altistuksenkaan jälkeen. Joissain tapauksissa on pystytty havaitsemaan HTHA sen alkuvaiheessa laboratoriotutkimusten avulla, kuten korkeasuurennos metallografiolla hyödyntäen optista- ja elektronimikroskooppia. Laitteista otetuista näytepalloista on paljastunut hyökkäyksen alkuvaiheessa olevia rakoja metallin raerajoilla. (API RP 941 2016, 9.)

Teollisuuden ja tutkimuksen kokemukset osoittavat lämpökäsittelyllä (PWHT) olevan HTHA:lle vastustuskykyä lisäävä vaikutus hiili- ja matalaseosteisille teräksille, joita käytetään vetykäsittelyssä. PWHT vakauttaa karbidit, jolloin se vähentää vedyn käytettävissä olevan hiilen määrää ja näin ollen lisää vastustuskykyä HTHA:ta vastaan. (API RP 941 2016, 10.)

Metallurgisesti tai hitsaamalla liitettävällä pinnoitteella (clad tai WOL) voidaan huomattavasti vähentää vedyn osapaineen vaikutusta perusaineeseen. Vedyn osapaineen vaikutuksen vähentäminen riippuu materiaaleista ja pinnoitteen suhteellisesta paksuudesta, sekä perusaineesta. Mitä paksumpi pinnoite on suhteessa perusaineeseen, sitä alempi vedyn konsentraatio. Tästä on tehty tarkkoja laskuja ja määrittämiä, mitä millaisellakin pinnoitteella saadaan hyödyksi HTHA:ta vastaan, millekin teräkselle. Lisää informaatiota on saatavilla myös dokumentista API TR 941. (API RP 941 2016, 12-13.)

HTHA on tarkastuksen kannalta erittäin haasteellinen. Aikaisessa vaiheessa hyökkäystä rakojen tai pienien säröjen havaitseminen on vaikeaa. Pitkälle edenneen hyökkäyksen merkittävät murtumat ovat paljon helpompia havaita, mutta siinä vaiheessa on jo todennäköisesti aiheutunut myös laitteen vikaantuminen. HTHA on tunnettu perusaineelle aiheuttavasta vauriosta, mutta sitä havaitaan myös intensiivisenä hyökkäyksenä esiintyen yhdensuuntaisena halkeiluna ja säröilynä hitsien lämpövaikutusalueilla. HTHA:n enna-

koimiseen on erilaisia taulukoita ja käyriä, joita voidaan käyttää apuna tarkastussuunnitelmien tekemiseen, kun tiedetään laitteen käyttö- ja operointihistoria. Useat laitteiden käyttäjät eivät tarkasta laitteita ilman tiettyjen operointiarvojen mukaisten rajojen ylityksiä. Riittävällä datalla (operointi parametrit, ikä, pinnoitteen kunto, lämpökäsittelyt ja niin edelleen) laitteen tai putkiston historiasta voidaan määrittää tarkastussuunnitelma. (API RP 941 2016, 13.)

HTHA vauriot voivat ilmetä hitseissä ja sen vaikuttamilla alueilla (HAZ) tai perusaineessa. Jopa näillä tietyillä alueilla vahingon suuruus voi vaihdella jo paljon. Mikäli vaurioita epäillään, niin on tehtävä perusteellinen tarkastus, joka tarkoittaa kyseisistä alueista näytteiden ottoa ja niiden tutkimista. Perusaineelle tarkastusmenetelmistä parhaita ovat UT-tekniikat, joilla on suurin todennäköisyys HTHA vaurioiden havaitsemiseen vielä silloin, kun HTHA on rakoja kehittävässä vaiheessa ennen merkittävien säröjen muodostumista. Muut menetelmät pystyvät havaitsemaan HTHA:ta vain, kun erilliset säröt ovat jo syntyneet ja materiaalin mekaaniset ominaisuudet ovat jo heikentyneet olennaisesti. (API RP 941 2016, 14.)

Hitseissä, joissa voi olla hyvinkin paikallisia HTHA-vaurioita, pidetään tehokkaana vain kahta eri UT-menetelmää. Korkea taajuuksista SWUT-menetelmää ja ABSA (angle-beam spectrum analysis) ovat suositeltuja käyttää HTHA:n vaurioiden havaitsemiseen rakoiluvaiheessa. Tavanomaiset SWUT- ja TOFD-menetelmät voivat olla hyödyllisiä HTHA:n havaitsemiseen myöhemmissä vaiheissa, joissa on jo merkittävää halkeilua. Kun laitteen sisäpinnalle on mahdollista päästä, niin fluorisoivaa magneettijauhetarkastusta (WFMT) voidaan käyttää menetelmänä pinnan rikkoneiden HTHA vaurioiden havaitsemiseen (säröt). Silmämääräisellä tarkastuksella voidaan havaita pinnalla pienen kolikon kokoisia rakkuloita, jotka voivat olla yhdessä indikaatio sisäisistä HTHA-vaurioista. Paikan päällä tehtävällä metallografialla voidaan tehokkaasti havaita alkuvaiheen HTHA (hiilenkato ja rakoilu) teräksen pinnalta, kuten myös muita vauriomekanismeja, jotka aiheuttavat säröilyä. (API RP 941 2016, 13-14.)

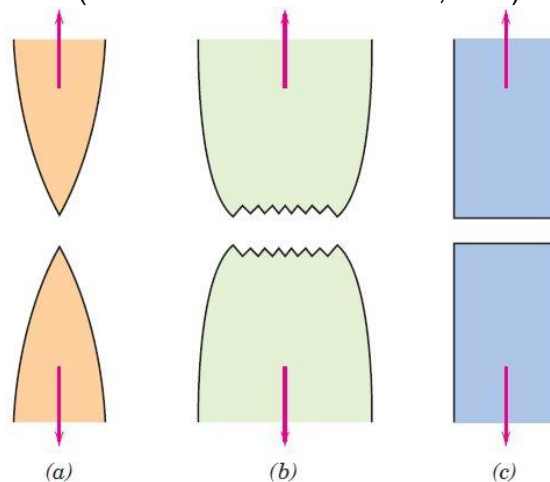
Jäljennetarkastus ja mikrorakenteen tulkinta vaatii tekijältä ammattitaitoa. Jäljennetarkastus tutkii vain tiettyä pientä alaa, joten muita menetelmiä tulisi käyttää tarkastustulosten varmentamiseksi. Jäljennetarkastus edellyttää pääsyä pinnalle ja voi vaatia pienen kerroksen poistamista prosessipuolen pintamateriaalista parhaan tarkastustuloksen saamiseksi. On muistettava, että HTHA saattaa olla pinnan alla, eikä näin ollen paljastu pintatarkastusmenetelmillä kuten jäljennetarkastuksella tai WFMT:llä. HTHA-vauriot syntyvät usein ilman, että materiaalin pinnalle muodostuu rakkuloita. (API RP 941 2016, 14.)

Pinnoitetuissa laitteissa HTHA-vauriot esiintyvät yleensä kohdissa, joista pinta on päässyt vaurioitumaan tai irtoamaan perusaineesta. Pullistumina irronnut pinnoite voi olla merkki HTHA-vauriosta. Paikalliset vauriot pinnoitteen alla voivat jäädä huomaamatta, jos valvonnassa keskitytään vain hitsaussaumoille ja yhteille sopiviin tarkastusmenetelmiin. (API RP 571 2011, 5-84.)

4.4 Haurasmurtuma (Brittle Fracture)

Haurasmurtuma syntyy äkillisesti ja on erittäin vaarallinen mekaaninen vauriomekanismi. Metalleille on kaksi erilaista murtumamekanismia, joko hauras tai sitkeä murtuminen. Murtumien luokittelu perustuu materiaalin kykyyn hallita plastista muodonmuutosta. Sitkeät materiaalit vaativat tyypillisesti paljon energiaa plastiseen muodonmuutokseen ennen murtumaa ja vaurioituminen on näin ollen pitkäkestoisempaa ja helpommin ennakoitavissa, sekä havaittavissa. Kuitenkaan haurasmurtumassa ei välttämättä ole kuin vähän tai ei ollenkaan plastista muodonmuutosta, joka tekee siitä erityisen vaarallisen. (Callister & Rethwisch 2015, 287.)

Kuva 18 havainnollistaa murtumismekanismien eroja. Murtumismekanismit (a) ja (b) kuvastavat sitkeää murtumista, joissa tapahtuu plastista muodonmuutosta ennen lopullista murtumaa, kun taas kuvassa (c) murtuma tapahtuu haurasmurtumana kokonaan ilman plastista muodonmuutosta. (Callister & Rethwisch 2015, 288.)



Kuva 17 Murtumismekanismit (Callister & Rethwisch 2015, 288.)

Materiaalin muokkaaminen esimerkiksi hiomalla tai hitsaamalla muuttavat materiaalin mikrorakennetta. Murtumista voivat aiheuttaa mikroainesosat, kuten sulkeumat, aineen

hauraat partikkelit ja raerajoilla ovat kerrostumat jotka johtavat halkeamiseen, mikäli jännitys ylittää materiaalille kriittisen tason. (Hertzberg 1996, 266.)

Haurasmurtuma voi edetä raerajojen välissä tai niiden lävitse. Haurasmurtumaan johtavia syitä ovat muun muassa väsyminen, erilaiset jännitykset, alttiutta lisäävä rakenteen muoto esimerkiksi terävät kulmat, ympäristöolosuhteet, viruminen, materiaalin sisälle syntyneet virheet ja muutokset. (Callister & Rethwisch 2015, 322 - 323.)

Kuvassa 19 sitkeä alumiini (a) on selkeästi kuroutunut ennen murtumista, kun taas hiili-teräksessä (b) on selvä haurasmurtuma, jossa ei ole merkkiäkään plastisesta muodonmuutoksesta. (Callister & Rethwisch 2015, 288.)



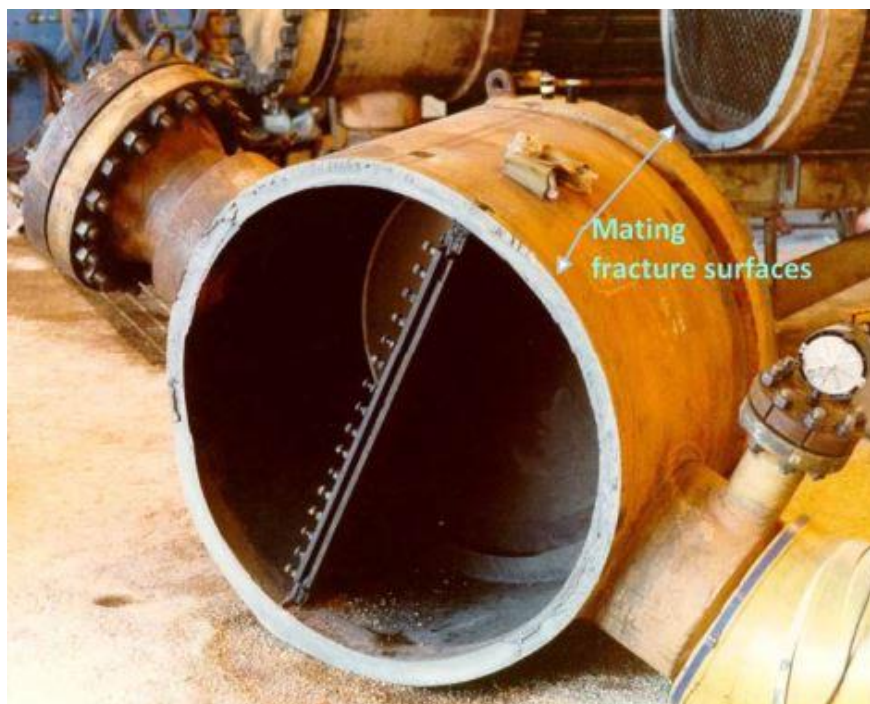
Kuva 18 Murtopinnat (Callister & Rethwisch 2015, 288.)

Erityisesti vanhat, vähän seostetut teräkset ovat alttiita haurasmurtumalle. Alttiita ovat myös 400-sarjan ruostumattomat teräkset. Teräksen puhtaus ja raekoko vaikuttavat olennaisesti haurasmurtuma-alttiuteen. Useimmat prosessit toimivat korkeissa lämpötiloissa, joten suurin huolenaihe haurasmurtumien ilmenemisen kannalta on laitteiden käynnistyksen ja sammutuksen tai tiiveyskokeiden aikana. Haurasmurtuma voi esiintyä myös jäädytyksen aikana yksiköissä, jotka käsittelevät esimerkiksi kevyitä hiilivetyjä kuten metaania, etaania/eteeniä, propaania/propeenia tai butaania. (API RP 571 2011, 4-27.)

Jalostamoilla käytettyjen metallien ja metalliseoksien joukossa ovat tietyt hiili- ja niukaseosteiset teräkset, joiden korkeiden transitiolämpötilojen vuoksi tarvitaan erityistoimenpiteitä painekokeiden aikana. Jos kyseiset teräkset ovat alhaisemmissa lämpötiloissa kuin niiden transitiolämpötila on, niin sitkeys on tällöin alhainen ja ne ovat paineisnettuna alttiita haurasmurtumalle. (NACE International 2013, 1-80.)

Murtumat ovat yleensä suoria, eivätkä lähde haarautumaan eri suuntiin. Plastista muodonmuutosta ei myöskään ole juuri havaittavissa. Mikroskooppisesti tarkastellessa murtumapinta on laajalti lohjennut ja mikrohuokokset ovat hyvin vähän yhteensulautuneet. (API RP 571 2011, 4-28.)

Kuvassa 20 on haurasmurtuma seinämävahvuudeltaan 2,2” paksussa lämmönvaihtimen vaipassa. Materiaaliltaan C-0.5Mo lämmönvaihdin on painekokeen myötä kauttaaltaan katkennut. (API RP 571 2011, 4-30.)



Kuva 19 Haurasmurtuma lämmönvaihtimessa (API RP 571 2011, 4-30.)

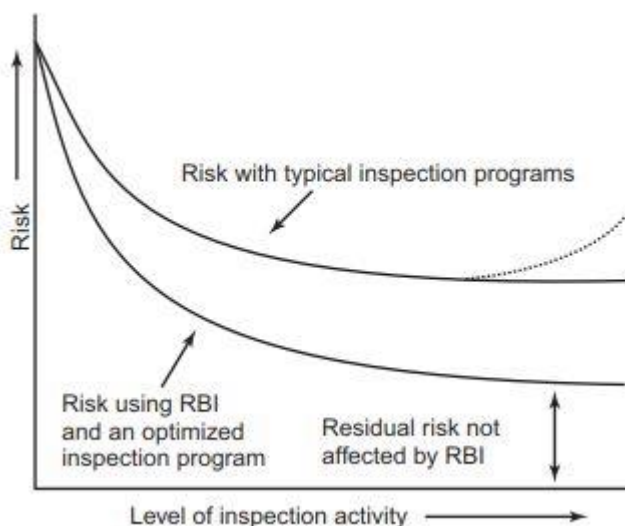
Haurasmurtumia ei voida normaalisti havaita tarkastusmenetelmillä ennen niiden syntymistä. Haurasmurtumille herkät kohteet tulee tarkastaa aikaisemmin muissa tarkastuksissa havaittujen puutteiden perusteella. (API RP 571 2011, 4-28.)

5 RISKIPERUSTEINEN TARKASTUS (RBI)

API RP 580:n tarkoituksena on tarjota käyttäjilleen perustiedot ja suositellut käytännöt riskiperusteisen tarkastusohjelman kehittämiseen, käyttöön ja ylläpitoon. Se tarjoaa myös ohjausta painelaitteita käyttäville operaattoreille ja suunnittelijoille painelaitteiden tarkastusohjelman kehittämisessä ja käyttöönotossa. Pääpainona on turvallinen ja luotettava operointi riskien perusteella priorisoidun tarkastustoiminnan avulla. (API RP 580 2016, -3.)

API RP 580 on tarkoitettu erityisesti hiilivety- ja kemian prosessiteollisuuteen. Riskiperusteisen tarkastuksen hyödyntäminen tarjoaa laitteiden tarkastuksen jatkuvan parantamisen ja vähentää järjestelmällisesti riskejä vaurioitumisille. (API RP 580 2016, 1-2.)

Kuviossa 1 on esitetty käyriä, jotka kertovat tarkastuksien määrän vaikuttamisesta riskiin. Tarkastuksiin investoitaessa riski luonnollisesti pienenee, mutta vain tiettyyn rajaan asti jonka jälkeen tarkastusten tuottavuus alkaa laskemaan ja lopulta vaikuttaa enää hyvin vähän riskien pienenemiseen. Jossain tapauksissa liiallinen tarkastus voi jopa aiheuttaa ylimääräistä heikkenemistä, kuten esimerkiksi kosteuden pääsy laitteiden sisälle niitä avattaessa (katkoviiva). (API RP 580 2016, 13.)



Kuvio 1 Riskiperusteisen tarkastusohjelman käytön vaikutus (API RP 580 2016, 13.)

RBI-ohjelma tarjoaa johdonmukaisen menetelmän optimaalisen yhdistelmän muodostamiseksi tarkastusmenetelmien ja -taajuuksien suunnittelemiseksi. Käytävissä olevat tarkastusmenetelmät voidaan arvioida kullekin kohteelle erikseen ja näin ollen pienentää

vaurioitumistodennäköisyyttä. Ohjelmaa voidaan jatkuvasti kehittää viemällä järjestelmään tietoa. Avainasemassa on riskien arviointi kullekin laitteelle ja sitä kautta sopivimpien tarkastustekniikoiden valitseminen kohteen mukaisesti. Kuviossa 1 alempi käyrä osoittaa, miten tehokkaasti sovellettu RBI-ohjelma pienentää riskejä enemmän samalla tarkastusmäärällä kuin perinteiset tarkastusohjelmat. Tämä johtuu siitä, että RBI keskittyy korkeampien riskien kohteisiin ja jättää matalamman riskin kohteet vähemmälle tarkastushuomiolle. (API RP 580 2016, 13.)

5.1 Riskiperusteisen tarkastusohjelman vaatimukset

API 580 RP sisältää kummatkin tavat, vähimmäisvaatimukset tarkastusvälien määrittämiseen RBI-analyysin avulla, sekä sääntöperustaisten käytäntöjen mukaisen tarkastusvälien määrittämisen. Lisäksi se tarjoaa suositellut tavat riskianalyysin käyttöön tehokkaan tarkastussuunnitelman kehittämiseksi. Tarkastussuunnittelu on systemaattinen prosessi, joka alkaa tuotantovälineiden ja -laitteiden tunnistamisella kulminoituen tarkastusten suunnitteluun. (API RP 580 2016, vii.)

Riskiperusteinen tarkastusohjelman avainasioita ovat:

1. Hallintajärjestelmät dokumentaation ylläpitoon, henkilöstön pätevyudet, vaaditun datan laitteistosta, johdonmukaisen ohjelman ja analyysit.
2. Dokumentoitu menetelmä vaurioitumisen todennäköisyyden määrittämiseen (POF).
3. Dokumentoitu menetelmä vaurioitumisen seurauksien määrittämiseen (COF).
4. Johdonmukainen metodologia riskien hallintaan tarkastuksissa, prosessin valvonnassa ja muissa hallinnallisissa toimissa. (API RP 580 2016, 14.)

5.2 Seuraukset ja todennäköisyys

Yksi riskiperusteisen tarkastuksen tavoitteista on määrittellä kullekin laitteelle vikaantumisen aiheuttavat seuraukset (COF) ja kuinka todennäköistä vikaantuminen on (POF). Esimerkiksi jos paineastia alkaa vuotamaan eristeiden alaisen korroosion aiheuttaman vuodon takia, niin jotkut seuraavista seurauksista voivat olla mahdollisia:

- a) Höyrypilven muodostuminen, joka voi syttyä ja aiheuttaa henkilövahinkoja ja lisää vaurioita laitteille.

- b) Myrkyllisten kemikaalien vapautuminen, joka voi aiheuttaa terveysongelmia.
- c) Vuoto, joka aiheuttaa ympäristöhaittoja.
- d) Pakottaa yksikön alasajoon, joka johtaa taloudellisiin menetyksiin.
- e) Muut turvallisuus-, terveys-, ympäristö- ja/tai taloudelliset vaikutukset.

Yhdistämällä todennäköisyys yhdelle tai useammalle edellä mainitulle tapahtumalle saadaan määritettyä toiminnalle riski. (API RP 580 2016, 14). Todennäköisyys (POF) määritetään kahden keskeisen seikan mukaisesti:

- a) Vauriomekanismit ja nopeus, jotka kohdistuvat kohteen materiaaliin sisäisen ja ulkoisen toimintaympäristön takia.
- b) Tarkastusohjelman tehokkuus tunnistaa ja seurata vauriomekanismeja niin, että laitetta voidaan korjata tai se voidaan vaihtaa ennen vikaantumista. (API RP 580 2016, 40.)

Jotkin vikaantumiset voivat esiintyä suhteellisen usein ilman merkittäviä haitallisia vaikutuksia, samoin kuin jotkin vikaantumisista voivat sisältää hyvinkin vakavan seurauksen, mutta todennäköisyys niille on alhainen. Tällöin riski ei välttämättä velvoita suoraan välittömille ja laajoille toimenpiteille. Kuitenkin jos todennäköisyyden ja seurauksen yhdistelmä eli riski on riittävän korkea eikä sitä voida hyväksyä, niin on tehtävä toimenpiteitä todennäköisyyden ja/tai seurausten lieventämiseksi hyväksyttävälle tasolle. (API RP 580 2016, 14–15.)

5.3 Riski

Riski on jonkin tapahtuman (yleensä negatiivisen) todennäköisyyden ja seurausten vakavuuden yhdistelmä. Matemaattisesti riski voidaan laskea seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\text{Riski} = \text{Todennäköisyys(POF)} * \text{Seuraus(COF)}.$$

Kaava 1 Riski (API RP 580 2016, 11.)

Tehokkaan riskinarvioinnin pitäisi olla järkevä, looginen ja rakenteeltaan prosessi, joka sisältää vähintään kaksi pääasiallista vaihetta:

1. Määrittää, miten merkittävä riski on, ja

2. Onko riski hyväksyttävä (API RP 580 2016, 11.)

Kun riski on tiedossa ja sen suuruus määritelty, niin riski voidaan hallita. Riskienhallinnalla pyritään pitämään riskit hyväksyttävällä tasolla. (API RP 580 2016, 11.)

RBI keskittyy systemaattisesti suhteellisen riskin määrittämiseen. Tällä tavoin tilat, yksiköt, järjestelmät, laitteet tai komponentit voidaan laittaa ikään kuin arvojärjestykseen. Absoluuttisen riskin laskeminen voi olla hyvin aikaa vievää ja kallista, eikä sitä voida aina tehdä liian monesta epävarmuustekijästä johtuen. Riskin määrittämisessä voidaan käyttää myös laadullisia ja semi-kvantitatiivisia lähestymistapoja, jotka ovat tehokkaita menetelmiä arvioida ja hallita riskejä. (API RP 580 2016, 14.)

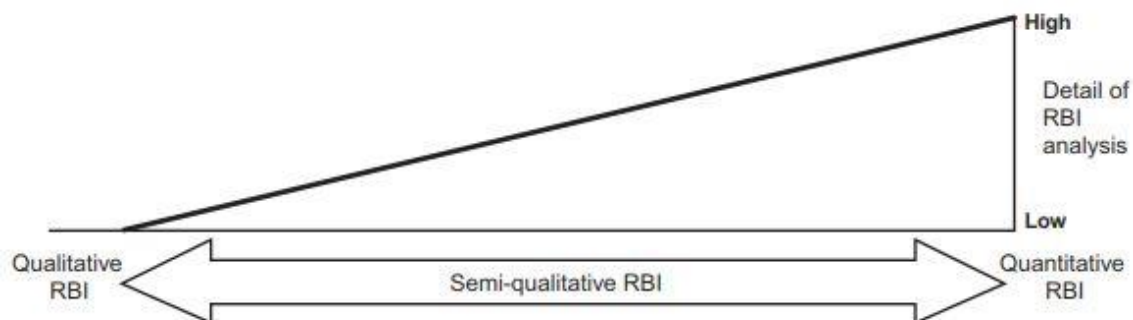
Riskinhallintatoimenpiteitä ovat myös auditoinnit, materiaalien ja rakenteiden muutokset, korroosionestoaineiden ja/tai pinnoitteiden käyttäminen, sekä muutokset toimintaolosuhteisiin. (API RP 580 2016, 17.)

5.4 RBI-tyypit

Riskiperusteisen tarkastuksen arviointia voidaan tehdä usealla eri tasolla. Lähestymistavan valinta riippuu useista eri muuttujista, kuten:

1. Tavoitteesta
2. Laitteiden ja varusteiden määrästä
3. Käytävissä olevista resursseista
4. Aikataulusta
5. Tuotantolaitoksen ja prosessien kompleksisuudesta
6. Käytävissä olevan datan luonteesta ja laadusta
7. Tarvittavasta riskien erottelutarkkuudesta

RBI menettelyä voidaan soveltaa laadullisesti, määrällisesti tai soveltaa esimerkiksi molemmilla tavoilla, eli semi-kvantitatiivisesti. Jokainen lähestymistapa tarjoaa systemaattisen tavan riskien seulomiseksi, potentiaalisten alueiden tunnistamiseksi ja priorisoidun tarkastuslistan kehittämiseksi. Menetelmillä voidaan laskea jokaiselle kohteelle oma riskiluokitus, jota käytetään vaurioitumisen riskin arviointiin vaurioitumisen todennäköisyydellä (POF) ja -seurauksilla (COF). Nämä kaksi arvoa yhdistämällä saadaan arvioitua kohteen vaurioitumisriski. (API RP 580 2016, 16.)

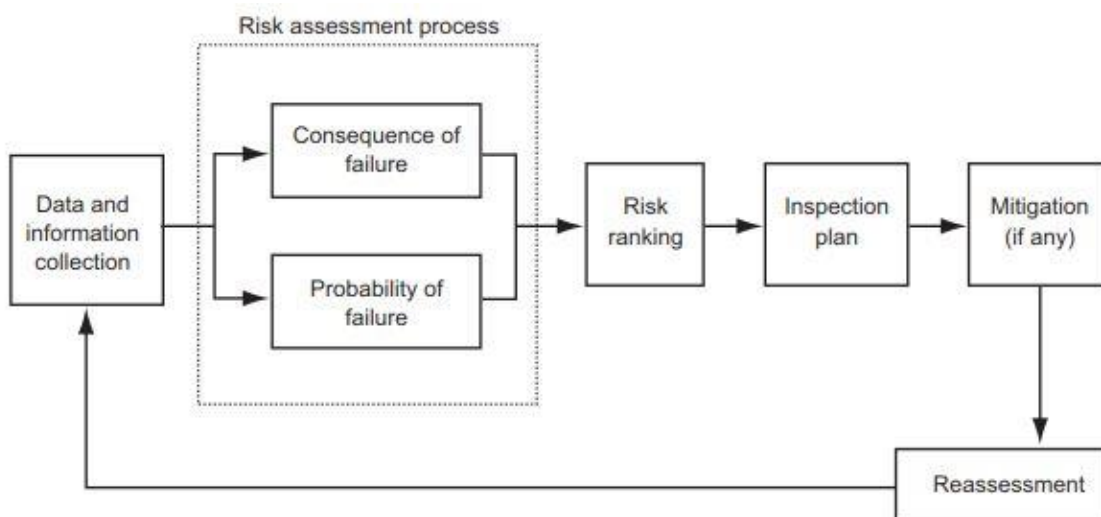


Kuvio 2 RBI tyypit (API RP 580 2016, 16.)

Kvantitatiivinen riskianalyysi tarkoittaa pääasiassa mallipohjaista lähestymistapaa, jossa käytetään laskettuja numeerisia arvoja riskien arviointiin ja laskemiseen. (API RP 580 2016, 8.)

Semi-kvantitatiivinen lähestymistapa kuvaa laadullisten ja määrällisten lähestymistapojen yhdistelmää. Siinä on hyvin merkittäviä etuja pelkkään laadulliseen tai määrälliseen lähestymistapaan nähden kuten esimerkiksi laadullisen tavan nopeus ja kvantitatiivisen tavan tarkkuus. Tyypillisesti tarvitaan miltei sama määrä dataa kuin kvantitatiivisessäkin lähestymistavassa, mutta ei niin yksityiskohtaisesti. (API RP 580 2016, 18.)

Lähestymistavasta riippumatta, RBI-prosessi kulkee kuvion 3 mukaisesti.

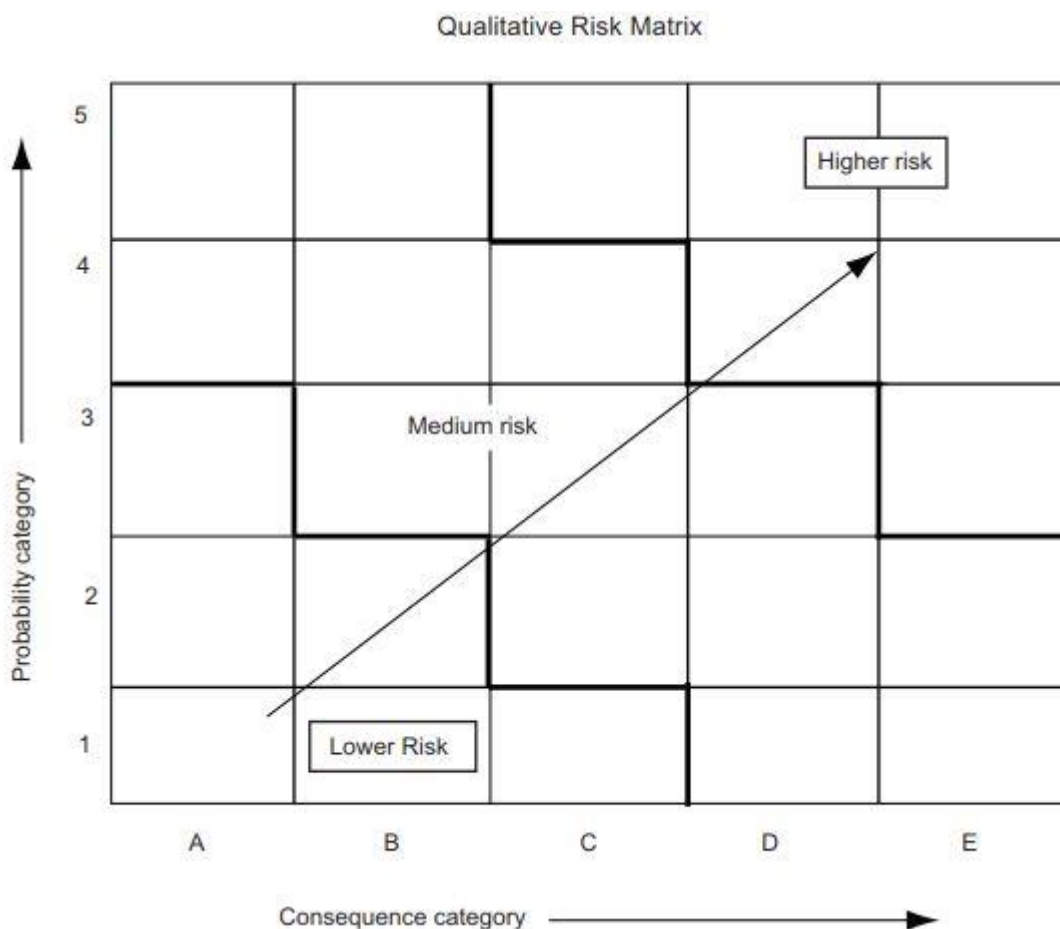


Kuvio 3 RBI-prosessikaavio (API RP 580 2016, 19.)

Käytännössä on useita tekijöitä, jotka vaikuttavat vahingon todennäköisyyden ja seurauksen arviointiin joita ei voida täysin ottaa huomioon käytettäessä pelkkää laadullista tai määrällistä menetelmää. Siksi kummankin menetelmän yhdistetty käyttäminen voi tuottaa tehokkaimman ja luotettavimman riskinarvioinnin. (API RP 580 2016, 19.)

5.5 Riskimatriisi

Lasketut riskiarvot voidaan esittää monella eri tavalla josta riskimatriisi on hyvin tehokas tapa esittää jalostamon laitteisiin tai prosessiyksiköihin kohdistuvia riskejä ilman numeerisia arvoja. Esimerkkinä oheinen riskimatriisi, jossa seuraus ja todennäköisyys on luokiteltu ja järjestelty siten, että riskiluokka on sitä korkeampi, mitä lähempänä taulukon oikeaa yläkulmaa mennään. (API RP 580 2016, 58-59.)



Kuvio 4 Riskimatriisi (API RP 580 2016, 59.)

Matriisin ruudut voidaan määrittää eri alueisiin niin kuin tässä ja kuviot voivat olla myös epäsymmetrisiä. Kun riskiluokitus on laskettu laitteille, niin riskimatriisia voidaan hyödyntää tarkastusten prioriteetin määrittämiseen. (API RP 580 2016, 59.)

Riskimatriisiin perustuen tehdään myös riskien hallintaa. Seuraavilla riskien lieventämistoimenpiteillä voidaan alentaa riskiluokitusta:

1. Käytöstä poisto – Onko laite välttämätön yksikön toiminnalle?

2. Tarkastus ja korjaus – Voiko kustannustehokas tarkastusohjelma korjaustoimenpiteineen vähentää riskiä hyväksyttävälle tasolle?
3. Seurausten ja/tai todennäköisyyden hillitseminen – Voidaanko laitteen vikaantumisesta aiheutuvia seurauksia (COF) ja/tai todennäköisyyttä (POF) lieventää esimerkiksi materiaalin, rakenteen tai toiminnan muuttamisella? (API RP 580 2016, 60–61.)

5.6 Kriittisten laitteiden luoksepäästävyys ja tarkastusajankäytön suunnittelu

Laitteiden heikkenemisnopeutta vauriomekanismien vaikutuksesta ei usein tiedetä täydellä varmuudella. Siihen vaikuttaa laitteen rakenne, kompleksisuus, vauriomekanismin tyyppi, prosessi- ja metallurgiset muutokset, luoksepäästävyys tarkastuksissa, tarkastusmenetelmien rajoitteet ja tarkastajan asiantuntemus.(API RP 580 2016, 41.)

Yksi osa opinnäytetyötä oli luoksepäästävyys suunnitteleminen halutuille tarkastuksille ja samalla tuottaa dataa tarkastusajankäytön arvioimiseen resurssisuunnittelun tueksi.

Laitteiden luoksepäästävyyttä tutkittiin laitekuvien ja kenttäkierrosten avulla, jotta voidaan varmistaa suunniteltujen tarkastusten tekeminen, mahdollinen eristeiden poisto- ja telinetarve. Hitsisaumojen risteyskohtien paikantaminen tehostaa myös eristeiden poistotyötä, kun eristeitä voidaan poistaa pelkästään halutuista kohdista. Lisäksi ajankäytön arvioiminen on tärkeää, kun resurssit ovat rajalliset. Työtä aloitettiin tekemään tulevien yksikköhuoltojen aikataulun mukaisessa järjestyksessä.

Selvitystyö pitää sisällään oheisen prosessinkertomuksen sisällä olevat toimenpiteet.

1. Laitteiden riskiperusteinen valitseminen materiaalivalintakaaviosta excel-taulukoon noin 10 laitteen erissä per kenttäkierros.
2. Valittujen laitteiden laitekuvien lukeminen, skannaaminen ja käsittely painelaittearkistosta mikäli sähköisestä tietokannasta ei löydy hitsausliitoksia ja niiden risteyskohtia sisältävää kuvaa. Hitsien risteyskohdat merkataan selvästi punaisilla ympyröillä niiden huomioinnin helpottamiseksi. Mikäli kuvista ei löydy risteyskohtia, niin tarkastetaan osaluettelosta vaippalevyjen määrä risteyskohtien määrän päättelemiseksi.

3. Laitekuvat tallennetaan verkkolevyille kaikkien osapuolien hyödynnettäväksi.
4. Lasketaan excel:ssä kunkin laitteen MSD:ssä ehdotetun tarkastuslaajuuden perusteella hitsisaumojen pituus laitekuvista seuraaville sisällölle kontaktissa oleville saumoille:
 - Laitteen hitsausliitokset ja niiden risteyskohtien lukumäärät vaipassa (myös supistuvat kohdat esimerkiksi reaktoreissa ja kolonneissa), lämmönvaihtimissa myös jakopäät, sekä ulos- ja sisääntulo-yhteet (yhteensä 2 kpl). (hitsisaumojen risteyskohdista tarkastetaan saumaa 250–500mm joka suuntaan risteyskohdan keskeltä).
 - Miesluukku/-luukkujen kehähitsisauman pituus
 - Vesitysyhteen kehähitsisauman pituus
5. Tehdään excel-taulukko solurivit ja niiden sisällöt, joihin tulee:
 - Laitteen nimi ja prosessiyksikkö.
 - Kohdan 4. hitsien laskutoimitukset.
 - Laitteen ulkohalkaisija, joka on yksi tärkeä telinetarpeen määrittäjä.
 - Tarkastuslaajuus (yhteet, putkisto, vaippa ja päädyt) seisokissa 2012 ja 2017.
 - Ehdotukset tarkastusmenetelmästä ja tarkastettavasta laitteen osasta/osista.
 - Tila kentällä suunniteltaville asioille tarkastustoimenpiteiden suorittamiseksi TA2017:ssa:
 - Laitteen eristyslaajuus (kuinka paljon niitä tarvitsee ottaa pois ja mistä kohdista: hitsisaumat ja niiden risteyskohdat, miesluukku, vesitysyhde ja muut yhteet).
 - Ulko- ja sisäpuolisten telineiden tarve luoksepäästävyyden selvittämiseksi. Mikäli tarkastustoimenpiteitä ei voida suorittaa kiinteiltä hoitotasoilta, maasta, tai sisäpuolelta ilman telineitä. Merkataan arvioitu telineiden korkeus tarkastettaville kohteille digikuvien tueksi.
6. Tulostetaan excel-taulukko yhdelle A4-paperille mahtuvaksi (~10 laitetta) kenttämuistiinpanoja varten, sekä karttakuva laitteiden paikantamisen nopeuttamiseksi. Lähdetään tulosteiden ja digikameran kanssa kentälle tutkimaan laitteet yksi kerrallaan läpi.

7. Aloitetaan tutkimalla laitteen eristyksen laajuustaso ja merkataan havainnot kenttämuistiinpanoihin. Tutkitaan myös laitteen telinetarve edelle mainitun perusteella ja merkataan mahdollisen telineen tarvittava korkeus, sekä lisähuomiot.

Esimerkiksi ”Pieni FA-säiliö pystyasennossa: kiinteät tikkaat miesluukulle ~3,5m korkeuteen, mutta ei hoitotasoa.”

8. Otetaan laitteesta digikuva miesluukun/luukkujen suunnasta. Mikäli laitteen vaippa on eristämätön, niin otetaan mahdollisimman hyvät kuvat risteyskohtien sijainneista.
9. Siirrytään kentältä takaisin toimistoon -> Digikuvien nimeäminen laitteen nimen mukaan ja siirto verkkolevylle.
10. Lopuksi kirjoitetaan kenttämuistiinpanot puhtaaksi TA2017 tarkastussuunnitelmaan.

5.7 Riskiperusteisen tarkastusohjelman hyödyt ja rajoitteet

Ensisijaisesti RBI-ohjelma tarjoaa suunnitelmia, joissa käsitellään keinoja hallita yksittäisiin laitteisiin liittyviä riskejä. Suunnitelmat painottavat turvallisuus-, terveys-, ympäristö- ja taloudellisia riskejä. RBI-suunnitelmat tulisi sisältää kustannustehokkaita toimia riskinhallintatoimenpiteiden kanssa, joiden toteuttaminen tarjoaa joko:

- a) Prosessiyksiköiden ja laitteistojen riskien pieneneminen yleisesti.
- b) Nykyisten riskien hyväksynnän tai ymmärtämisen. (API RP 580 2016, xi.)

RBI-suunnitelmat tunnistavat myös laitteita, joihin ei edellytetä tarkastus- tai muita riskitasonlieventämistoimenpiteitä jotka liittyvät laitteiston toimintaan. Tällä tavoin tarkastus- ja huoltotoiminta tulee kustannustehokkaammaksi. (API RP 580 2016, 1.)

Tavallisia määräaikaistarkastusten aikavälejä painelaitteille ovat 4 vuotta käyttötarkastukselle, 4 vuotta sisäpuoliselle tarkastukselle ja 8 vuotta määräaikaiselle painekokeelle. (Painelaite kunnossapito-opas, 2017.)

”Määräaikaistarkastukset ovat joko käyttötarkastuksia, sisäpuolisia tarkastuksia tai määräaikaisia painekokeita. Määräaikaistarkastuksen ajankohtaa voidaan siirtää enintään 13

kuukaudella”. (1144/2016, 56 §). Koska laitteille on näin ollen tehtävä pysäytyksen vaativa tarkastus vähintään 4 vuoden ja maksimissaan 13 kk siirron välein, niin RBI:stä ei saada merkittävää lisähyötyä tarkastusvälien pidentämiseen. Tarkastusohjelmiston kautta saatava riskiarvio ja data hyvin todennäköisesti kuitenkin nopeuttaa ja helpottaa perustelua, sekä pienentää tarvittavien lisätarkastusten määrää haettaessa lisääaikaa. Lisäksi RBI-ohjelmistoa hyödyntämällä pystytään:

- Lisäämään luotettavuutta ja prosessiturvallisuutta paremmalla riskienhallinnalla
- Priorisoimaan tarkastuksia riskiperusteisesti
- Tunnistamaan riskialttiit kohteet paremmin ja luotettavammin
- Välttämään ennakoimalla suunnittelemattomia pysäytyksiä
- Kehittämään tarkastustoimintaa jatkuvasti
- Koordinoimaan ja dokumentoimaan etenkin putkistotarkastuksia tehokkaammin
- Saamaan kustannussäästöjä edellä mainittujen asioiden perusteella kunnossapito- ja tarkastuskustannuksiin

Näistä merkittävimmäksi RBI:n käytön tuomaksi lisähyödyksi tulisi luotettavuuden ja prosessiturvallisuuden parantaminen, joita pystyttäisiin ohjelmiston avulla kehittämään etenkin pitkällä aikavälillä.

RBI:n käyttölaajuuksista semi-kvantitatiivinen RBI on paras vaihtoehto. Nesteellä ei ole vanhan laitekannan takia kaikkea kvantitatiivisen RBI:n vaatimaa dataa saatavilla, eikä myöskään sen vaatimalla tarkkuudella olevaa käyttöhistoriadataa. Lisäksi kvantitatiivinen RBI vaatisi huomattavasti enemmän resursseja sen käyttöönottamiseen, joka ei suhteessa toisi välttämättä haluttua lisähyötyä. Materiaalivalintakaaviot olisivat keskeinen osa ohjelmistoon syötettävää dataa ja kaavioiden riskiarvioita voitaisiin kahdentaa RBI-ohjelmiston avulla. Jotta RBI-ohjelmiston käyttöönotosta ja sen hyödyntämisestä saataisiin paras mahdollinen hyöty, niin olisi suosittelavaa käyttää API RP 580 kappaletta 17 ”Summary of Risk-Based Inspection Pitfalls” tarkistuslistana ja/tai auditointi työkaluna.

LÄHTEET

API 510 2014. Pressure Vessel Inspection Code In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration. 10th Ed. American Petroleum Institute.

API RP 571 2011. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. 2nd ed. American Petroleum Institute.

API RP 572 2009. Inspection Practices for Pressure Vessels. 3rd ed. American Petroleum Institute.

API RP 580 2016. Risk-based Inspection. 3rd ed. American Petroleum Institute.

API RP 941 2016. Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants. 8th ed. American Petroleum Institute.

Callister, W.D., Jr & Rethwisch, D.G. 2015. Materials science and engineering, 9th ed. Wiley, Hoboken, NJ.

Hertzberg, R.W. 1996. Deformation and fracture mechanics of engineering materials, 4th ed. Wiley, New York.

Hucińska, J. 2006. Influence of Sulphur on High Temperature Degradation of Steel Structures In The Refinery Industry. Gdańsk University of Technology Department of Materials Science and Engineering, Gdańsk, Poland. Viitattu 22.9.2016. <http://www.pg.gda.pl/mech/kim/AMS/012006/AMS01200602.pdf>

Jari Aromaa 2005. Korroosionestotekniikan Perusteet, 3rd ed. Helsinki University of Technology Publications in Materials Science and Engineering, Espoo.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi, 12th ed. Edita, Helsinki.

Kunnossapitoyhdistys 2004. Korroosiokäsikirja, 2nd ed. KP-Media, Rajamäki.

NACE International 2013. Corrosion Control in The Refining Industry Course Manual.

Neste Oyj 2016a. Perehdytys esitysmateriaali.

Neste Oyj 2016b. TA2017 Esitysmateriaali. Viitattu 21.10.2016 <http://portal.oilinfra.com/FI/toimialat/oljytuotteet/tuotanto/TA2017/Sivut/T2017.aspx>

Neste Oyj 2016c. TA2017_KK_info_092016_NLI.pptx Dia 7. Saatu Neste Oyj:ltä 14.9.2016.

Neste Oyj 2016d. Arvot ohjaavat liiketoimintaamme ja jokaista työntekijää. Viitattu 9.9.2016 <https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meist%C3%A4/arvot>

Neste Oyj 2016e. Juuremme. Viitattu 9.9.2016 <https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meist%C3%A4/juuremme>

Neste Oyj 2015. Puhtaammat ratkaisut strategiamme ydin. Viitattu 9.9.2016 <https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meist%C3%A4/visio-ja-missio/strategiset-tavoitteet>

Neste Oyj 2017. Tuotanto_organisaatio.pptx Dia 20. Saatu Neste Oyj:ltä 1.2.2017.

Neste Oyj 2013. Materiaalivalintakaavion laatiminen OQD-16133.

Painelaitelaki 1144/2016. 16.12.2016. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161144>

Teräsrakenneyhdistys 2015. Teräs kosketuksissa muiden materiaalien kanssa – Korroosionkestävyys.

Tiainen, T. 2010. "Syventävää materiaalitietoutta" Konetekniikan Materiaalioppi Edita Prima Oy.

Timo Kauppi 2013. Korkeiden lämpötilojen teräkset, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.

Turun Sanomat 2016. Neste tekee Naantalın jalostamoon jättiremontin. Viitattu 2.1.2017 <http://www.ts.fi/uutiset/talous/2784702/Neste+tekee+Naantalın+jalostamoon+jättiremontin>

Turvatekniikan keskus 2017. Painelaitteiden kunnossapito-opas.

Witting, L. & Pettinen, R. 2014. Hitsauksen materiaalioppi, 4th.ed. Suomen hitsausteknillinen yhdistys, Helsinki

